

構造物と氷盤相互作用時の貫入速度変化による氷盤歪への影響について

Ice Sheet Strain Area Measurements with Indentation Rate Change during Ice/Structure Interactions in Field Indentation Tests

酒井雅史*¹・勝井秀博*¹・竹内貴弘*²・河村宗夫*²
松下久雄*³・高脇透*⁴・寺島貴志*⁵・佐伯浩*⁶

Masafumi Sakai, Hidechiro Katsui, Takahiro Takeuchi, Muneeo Kawamura,
Hisao Matsusita, Tohru Takawaki, Takashi Terashima and Hiroshi Saeki

A study on ice loads during ice - structure interactions was started in 1993 by the Japan Ocean Industries Association (JOIA). The purpose of the tests was to investigate ice loads and ice failure characteristics, and to establish a new method of estimating ice loads during ice - structure interactions. The tests consisted of ice indentation tests, tests on physical properties of ice sheets, and measurements of ice sheet deformation. The test site was located at Futamigaoka Harbor on Lake Noto, Hokkaido, whose entrance faces the Sea of Okhotsk. This paper describes the results of ice sheet strain measurements using strain gages and the estimation of strain area with indentation rate change during ice/vertical-sided-structure interactions obtained during a winter test in 1998.

KEY WORDS: ice sheet deformation, strain area, strain rate, strain energy

1. はじめに

寒冷地の海岸や湖沼等に計画・建設される護岸、棧橋等の構造物の設計においては氷荷重を適切に評価することが必要となる。氷荷重は氷厚 h 、氷盤の貫入速度 V 、構造物幅 W に大きな影響を受け、特に貫入速度 V と氷盤の歪領域 L で定義される歪速度($\dot{\epsilon} = V/L$)の影響を受けることが知られている。これまで歪速度の算定ではどのような条件下でも、氷盤歪領域を構造物幅でのみ定義したものが一般的であり、氷厚や貫入速度との関係についてはその影響を合理的に評価した理論は少ないのが現状である。したがって、載荷時の歪領域を明確にし、歪速度と最大氷荷重の関係を把握することは、構造物の設計荷重を評価する上で重要な課題となる。本研究では野外実験において、コンクリート構造物や鋼構造物等の応力発生状況を把握するために用いられる歪ゲージを氷盤内に埋め込み、構造物幅および貫入速度をパラメータとした歪の計測を行い、歪の分布状況を把握し、氷盤歪領域の評価手法確立のための基礎データを取りまとめたものである。

2. 歪速度と氷荷重の関係

氷盤の破壊荷重の発生領域は歪速度により、3領域(歪速度の遅いダクタイル破壊領域 $\dot{\epsilon} \leq 10^{-4}$ 、歪速度の速いブリットル破壊領域 $\dot{\epsilon} \geq 10^{-2}$ 及びその中間領域のトランジション破壊領域 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3}$)に分類され、これまでの研究結果によれば、トランジション破壊領域で最大の氷盤破壊荷重が発生することが認識されている。また、この場合、歪領域 L については構造物幅 W を基準に $2W \sim 4W$ 程度と定義されている。これらの式の適用範囲は、構造物に対する氷盤の貫入速度が小さく(ダクタイル破壊領域)かつ構造物の幅(径)に比べて氷厚の大きい場合といわれており歪速度は氷厚とは無関係に定義されている。一方、貫入速度が大きくなる場合や氷厚に比べて構造物の幅(径)が大きくなる場合は、氷盤変形は氷厚の影響に関係するため歪領域 L は氷厚と相関があり、変形の速さは V/h に関係しているといわれている。

3. 計測内容

野外実験は、北海道網走市能取湖の能取漁港(二見ヶ岡地区)の港内で、平成10年1月～平成10年3月の期間中に行われた。歪の計測は、図-1の計測状況に示すように歪ゲージを氷盤内に埋め込み氷盤載荷時の歪データを計測した。貫入試験時の氷荷重は、貫入盤先端部に取り付けたロードセルの局部荷重データを10cm幅の分割パネル毎に計測するとともに、これらのデータを合計して全体荷重を算出した。また、同時に同一氷盤より採取した試料を用いて一軸圧縮試験を行い、圧縮強度とヤング率を測定した。

*¹ 正会員 大成建設(株)技術研究所(245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

*² 正会員 清水建設(株)技術研究所

*³ 正会員 三井造船(株)

*⁴ (株)三造試験センター

*⁵ 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株)

*⁶ 正会員 北海道大学 工学部 土木工学科

4.計測方法

氷盤歪計測の準備として、貫入試験前に歪ゲージの氷盤内の所定位置への埋め込みを実施した。歪ゲージは氷盤と剛性を近づけるため、ガーゼ状の素材で覆い、防水加工を施したものをを用いた。さらに、氷盤との付着が良好になるようにゲージ表面に珪砂をまぶして粗度をつけ、埋め込みが容易に行えるように事前に取り付け治具に固定した。貫入試験に先立ち、歪ゲージを所定配置に吊したフレームを結氷前の試験域に設置し、結氷後、10cm～20cmの所定氷厚になるまで7～10日間の養生を行った。貫入試験では貫入盤幅を $W=150\text{cm}$ 、 60cm 、 20cm とし、貫入速度を $V=0.03\text{cm/s}$ 、 0.3cm/s 、 3cm/s の3パターンに変化させて実験した。歪ゲージは図-2の配置図に示すように氷盤圧縮状況が計測可能ないように载荷方向に対して平行に埋め込んでいる。また歪ゲージは氷盤内に発生する歪の分布状況が把握できるように、貫入盤との接触面近傍は氷厚に近い10cm間隔に、遠くなるにつれて貫入盤幅の間隔に埋め込んだ平面的な配列とした。

計測結果から、貫入盤幅と氷盤への貫入速度の違いによる氷盤歪の分布状況を明らかにするとともに、氷荷重と氷盤歪との関連性について検討を行った。

5.計測ケース

氷盤歪の計測は貫入盤幅、貫入速度をパラメータとし、表-1に示す8ケースに対して行った。

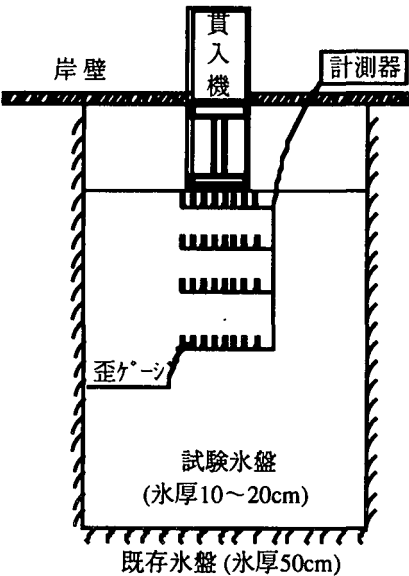


図-1 計測概況

表-1 計測ケース

試験ケース	貫入盤幅 $W(\text{cm})$	氷厚 $h(\text{cm})$	貫入速度 $V(\text{cm/s})$	アスペクト比	受圧面積 (cm^2)	貫入量 (cm)	計測時間 (sec)
T1	20	18	0.3	1.11	360	35	297
T2	20	18.5	0.03	1.08	370	35	1766
T3	20	18	3.0	1.11	360	35	72
T4	60	19	0.03	3.16	1140	35	1766
T5	60	19.5	0.3	3.08	1170	35	297
T6	60	18.5	3.0	3.24	1110	35	72
K0	150	17	0.3	8.82	2550	35	297
K2	150	18.5	0.03	8.11	2770	35	1766

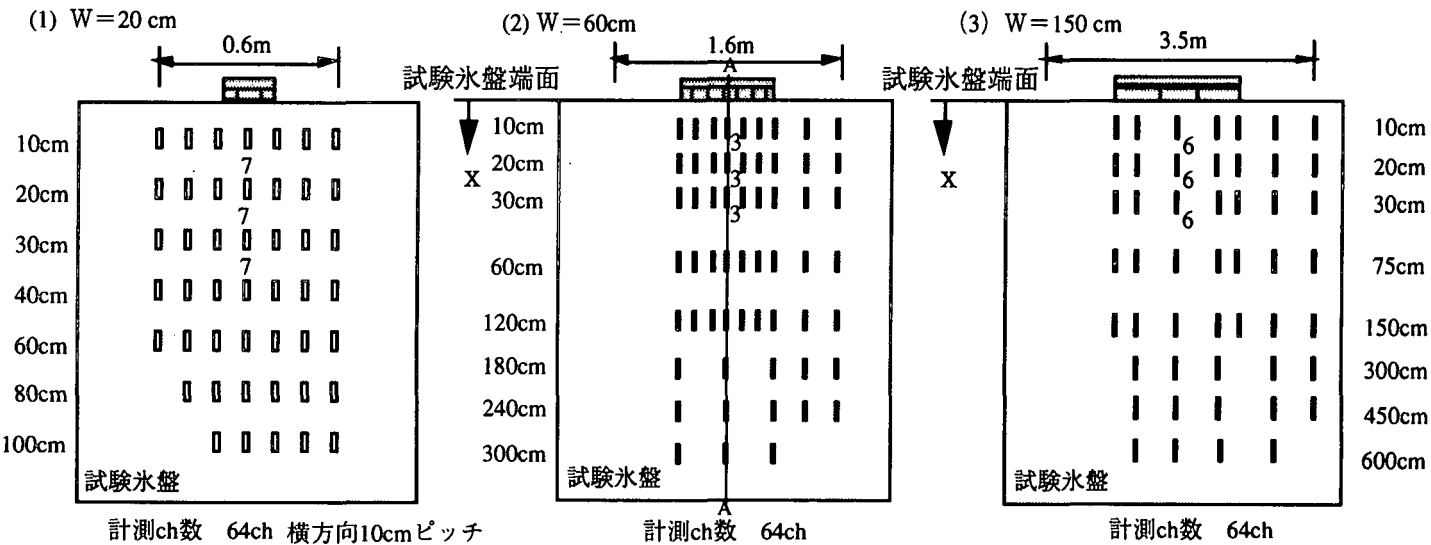


図-2 歪ゲージ配置図

6.計測結果と考察

(1) 氷盤の破壊様式

初期氷力作用時の破壊様式は、試験開始時の氷盤先端部の影響を受け、貫入盤と氷盤の接触が開始部分から順に氷盤が破壊するため、接触した瞬間の状況をビデオまたは目視により観察した。また、継続氷力作用時の破壊様式は、氷盤への貫入終了後に貫入盤前面および側面の氷盤形状を観測した。

一般に鉛直壁を有する構造物と氷盤との相互作用が生じた場合の氷盤の破壊モードは6種類に分類され、各々クリープ、放射状クラッキング、バックリング、周状クラッキング、スポーリング、クラッシングと呼ばれている。これらの破壊モードがどのような条件で発生するかは、アスペクト比と歪速度との関係により整理され、これまでの試験結果からSandersonによる氷盤破壊モード図が得られている。

今回の計測結果より氷盤破壊様式は貫入盤の氷盤への貫入速度に大きく依存することが明らかとなった。図-3に示すように、 $V = 0.03 \text{ cm/s}$ の場合はクリープ破壊が卓越し、その後下向きにバックリングや曲げ破壊の発生が確認された。 $V = 0.3 \text{ cm/s}$ および 3 cm/s の場合には、氷盤中央部の水平面内にクリベージクラックを伴ったスポーリング（フレーキング）破壊とクラッシング破壊が観測された。フレーキング破壊では最大氷力に到達した瞬間に貫入盤前面の氷盤がほぼ氷厚サイズで楔形に剥離する状況が観測されたが、 $V = 0.3 \text{ cm/s}$ の方が剥離する楔形状が大きいことがわかった。さらに破壊の範囲は貫入盤前面の氷盤に対して貫入盤幅×氷厚×貫入量の部分だけでなく、貫入盤の貫入方向に対して側面の氷盤にもクリベージクラックの発生が確認された。

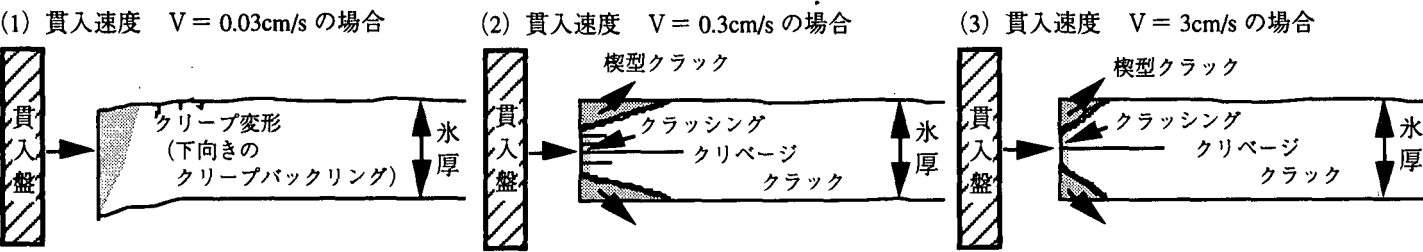


図-3 氷盤の破壊様式（試験での観測結果に基づく）

(2) 全体氷荷重

表-2に各ケースの荷重データ（初期最大氷力、最大氷圧力、ヤング率など）についてまとめた結果を示す。初期最大氷力および最大氷圧力は、貫入盤幅に関係なく、貫入速度が $V = 0.3 \text{ cm/s}$ の場合に発生した。これは、 $V = 0.3 \text{ cm/s}$ がトランジション破壊領域での貫入速度に相当するためである。また、最大氷力は $V = 3 \text{ cm/s}$ の場合が最も小さかった。これは、氷盤の破壊様式が原因と考えられる。すなわち、貫入速度が大きくなると、貫入盤と氷盤の接触面前面で氷盤が小さな楔形状に剥離する破壊を起こすためと考えられる。

表-2 計測結果（荷重データ）

試験ケース	貫入盤幅 (cm)	氷厚 (cm)	貫入速度 (cm/s)	初期最大氷力 (kN)	最大氷圧力 (kg/cm ²)	圧縮試験による 一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	ヤング率 (kg/cm ²)
T1	20	18	0.3	91.70	26.4	18.1	3180
T2	20	18.5	0.03	80.50	22.2	14.5	3570
T3	20	18	3.0	69.80	19.7	14.7	3790
T4	60	19	0.03	280.3	24.6	12.9	3020
T5	60	19.5	0.3	317.5	27.9	12.6	3040
T6	60	18.5	3.0	228.3	21.2	13.5	4110
K0	150	17	0.3	425.3	17.0	11.2	3590
K2	150	18.5	0.03	425.3	15.6	14.0	2000

(3) 氷盤の歪分布

図-4に各貫入盤幅での貫入速度毎の初期最大氷力発生時の歪の直線分布を示す。また、図-5に貫入速度変化による最大氷力発生時の歪発生状況を示す。歪は氷力とはほぼ同時刻に最大値を示し、貫入盤幅の5倍程度の範囲まで到達している。試験結果より、最大氷力発生時の氷盤歪は貫入盤との接触面でピークとなり、接触面から遠ざかるほど指数的に減少する。特に貫入速度 $V=0.03\text{cm/s}$ の場合、3ケース中で最も大きな値を示し、歪の減少傾向が著しい。この領域では貫入盤を後退させ荷重を除荷すると、氷盤に生じた歪は元に戻ろうとする傾向にあることが観測された。このことから貫入盤幅の約5倍程度離れた領域では、弾性変形が生じていることがわかる。また、貫入速度の小さい場合は図-4からも明らかのように、氷盤がクリープ変形し、弾性的な歪領域の広がりは大くなる傾向にある。さらに歪の平面分布で貫入盤から同一距離だけ離れた地点での歪を比較すると、貫入盤の中央部延長線上に発生する歪は外側の歪よりも大きいことが明らかとなった。

なお、図-4、図-5の縦軸は、最大氷力発生時の各測点での氷盤歪 ϵ を作用した荷重から算定した

基準歪 $\epsilon_0 = \text{最大全氷力} F / (\text{貫入盤幅} W \times \text{氷厚} h \times \text{ヤング率} E)$ (1)

で除した無次元量で示した。全氷力は貫入試験での各パネルに作用する局部氷力を合計した結果を、ヤング率は物理試験の計測結果を使用した。

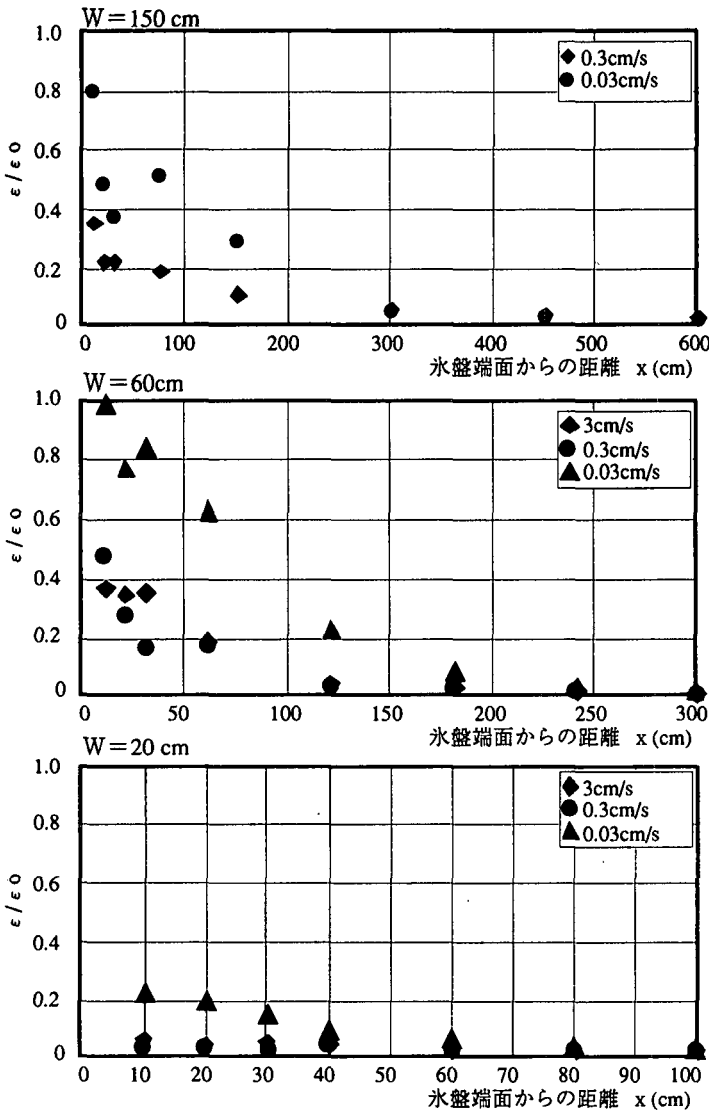


図-4 最大氷力発生時の氷盤歪の直線分布 (A-A断面)

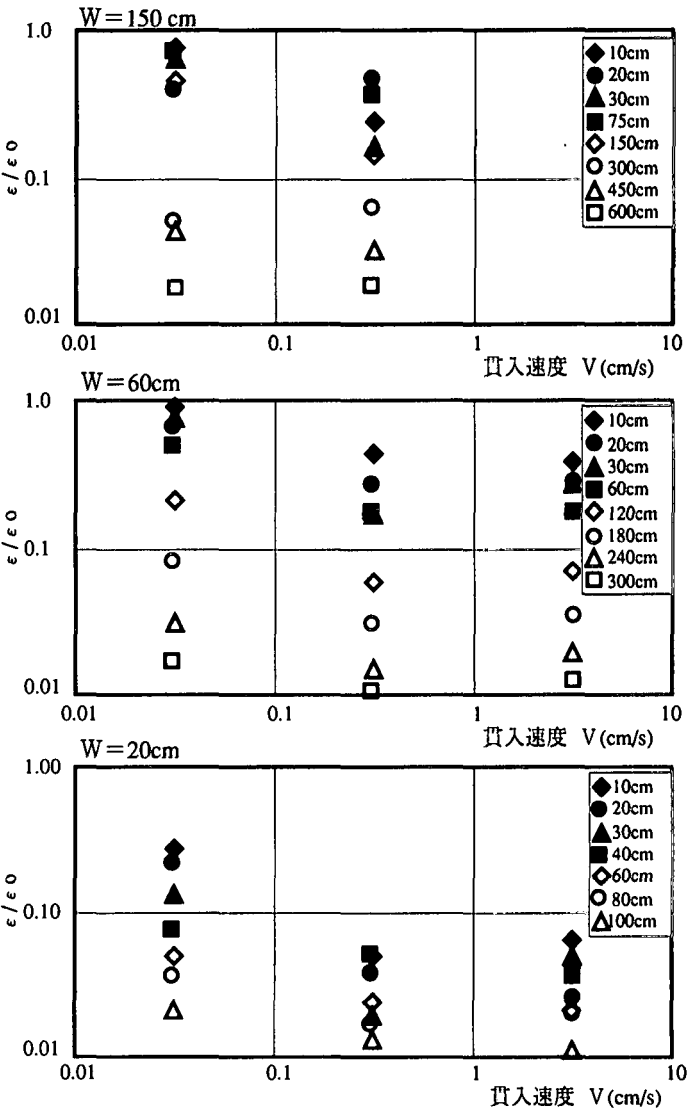


図-5 貫入速度変化による氷盤歪の分布 (A-A断面)

上記の破壊様式の観測結果と歪ゲージによる計測結果より、氷盤の歪領域には弾性的な歪領域と塑性的な歪領域が存在し、図-6に示す3つの領域に分類される。塑性的な領域は、貫入盤前面および側面のスポーリング（フレーキング）破壊またはクラッシング破壊を伴った氷盤破壊領域と貫入盤前面および側面のクリベージクラックが発生した塑性変形領域に分類できる。

(4) 歪領域の推定

氷盤を弾性体と仮定した場合に、初期最大氷力発生時に氷盤内の貫入方向の歪エネルギーが氷盤破壊のエネルギーに置き換わったと仮定して破壊領域の算定を試みた。

氷盤内に発生する歪エネルギー I は以下の式により求めることができる。

$$I = \int \int \sigma d\epsilon dV = (\epsilon^2 E V) / 2 \quad (2)$$

σ ：内部応力、 ϵ ：氷盤歪、 E ：ヤング率、 V ：歪の影響範囲の氷盤体積 $(=WhL)$ 、 W ：構造物幅、 h ：氷厚、 L ：歪領域

(2)式を用い、初期全氷力発生時に各測点での歪計測値から算定した貫入方向の歪エネルギーと(1)式から算定した基準歪エネルギーを比較し、破壊領域の大きさを算出した。図-7に氷盤内の貫入方向の歪エネルギー分布の一例を示す。計算結果より $V = 0.3 \text{ cm/s}$ および 3 cm/s の場合には、破壊領域の大きさは約 $5 \sim 8 \text{ cm}$ 程度なり、貫入方向の歪だけでなく、鉛直方向や貫入盤に対して平行方向にも氷盤歪が発生していることを加味すると、氷厚と相関があると考えられる。これは、初期最大氷力に到達した瞬間に貫入盤前面の氷盤が氷厚程度の大きさで楔形に剥離する状況が観測されたことから確認された。

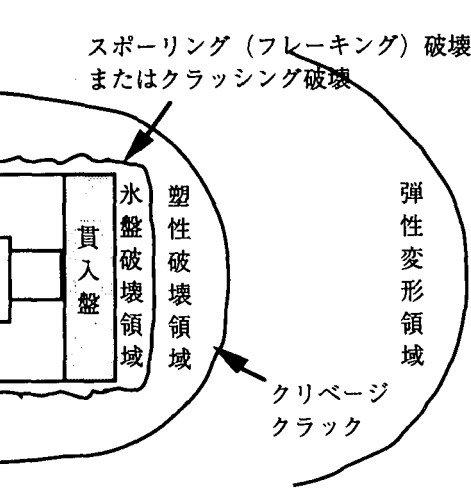


図-6 氷盤に発生する歪領域

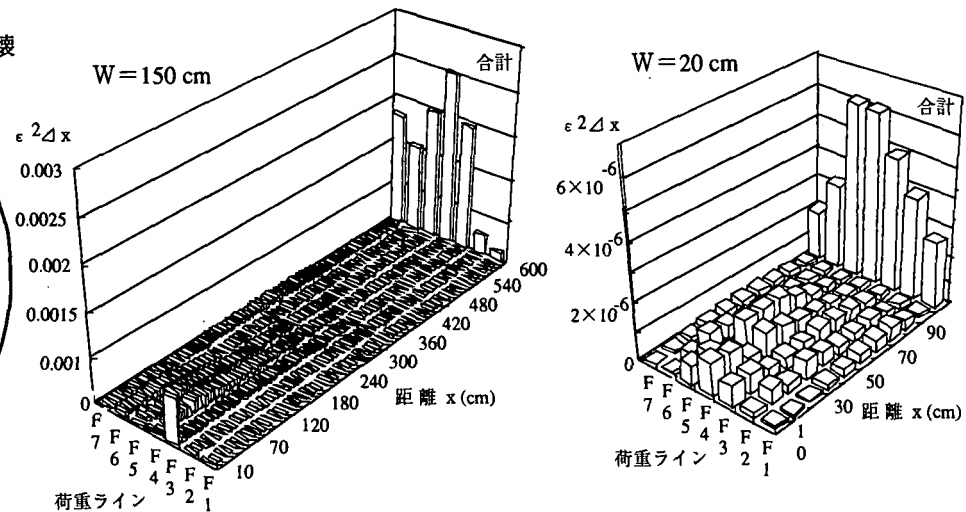


図-7 氷盤内の貫入方向の歪エネルギー分布 ($V=0.3 \text{ cm/s}$)

7. 今後の検討課題

載荷時の歪領域を明確にし、歪速度と最大氷荷重の関係を把握することは、構造物の設計荷重を評価する上で重要な課題となる。既往の研究より、氷荷重はトランジション領域において極大値を示すことが明らかとなっていることから、歪速度をトランジション領域で扱うことが可能な算定式の確立が望まれる。そのためには、貫入速度やアスペクト比などから、歪領域が構造物幅または氷厚に相関があるかを判断することが必要となる。今回の試験結果では図-8に示すように歪領域を従来と同様に貫入盤幅で定義すると歪速度が 10^3 オーダーで、氷厚で定義すると 10^2 オーダーの場合に最大氷力が発生する。したがって、今後、氷荷重を合理的に評価するためには対象構造物の型式・大きさ、氷盤への貫入速度、氷厚等の条件から氷盤の破壊パターンを推定し、適切な歪領域と歪速度を選択する必要がある。

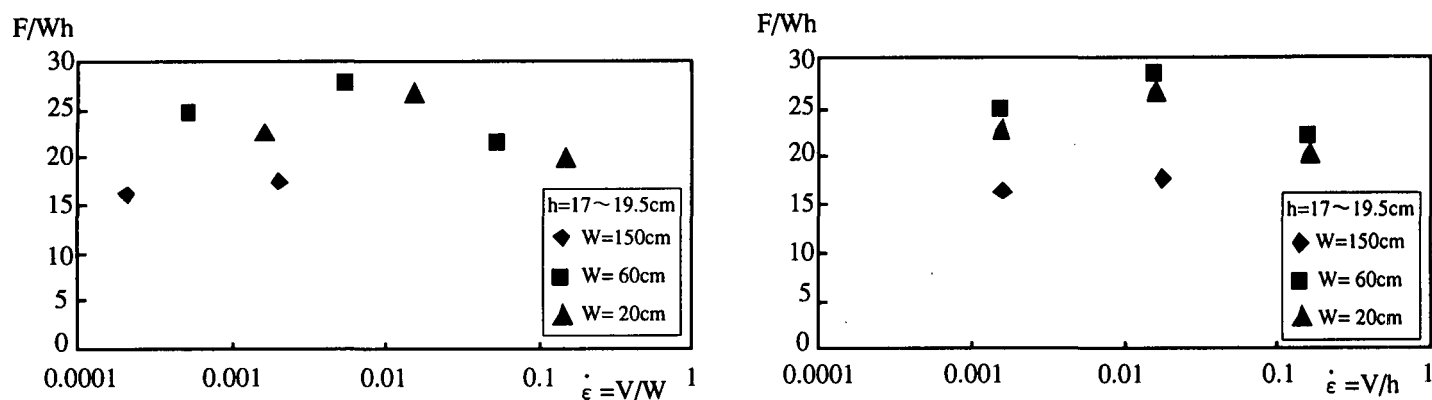


図-8 氷荷重と歪速度の関係（初期最大氷力発生時）

8.まとめ

- (1) 氷盤の歪領域には、弾性的な歪領域と塑性的な歪領域が存在し、3つの領域に分類することができる。
- (2) 試験結果より、弾性的な領域では荷重を除荷すると歪が元に戻ろうとする傾向があり、貫入盤幅と相関があることがわかった。
- (3) 塑性的な歪領域には、貫入盤前面の氷盤破壊（剥離）領域と塑性変形領域がある。破壊領域に対して氷盤を弾性体と仮定した場合、氷盤内の貫入方向の歪エネルギーが氷盤の破壊エネルギーに置き換わったと仮定して破壊領域の算定を試みた結果から、氷厚と相関があることがわかった。これは、最大氷力に到達した瞬間に貫入盤前面の氷盤が氷厚サイズで楔形に剥離する状況が観測されたことから確認された。
- (4) 塑性変形領域では貫入時に貫入盤の前面および側面の氷盤内に氷厚のほぼ中央部にクラック（クレープ・クラック）が発生するのが観測された。
- (5) 試験結果より、最大氷力発生時の氷盤歪は貫入盤との接触面でピークとなり、接触面から遠ざかるほど指数的に減少する。特に貫入速度 $V=0.03\text{cm/s}$ の場合、3ケース中で最も大きな値を示し、歪の減少傾向が著しい。
- (6) 貫入速度の小さい場合は氷盤がクリープ変形し、弾性的な歪領域の広がりは大くなる傾向にあり、逆に貫入盤前面の塑性的な歪領域は小さくなる傾向にある。
- (7) 氷荷重を合理的に評価するためには、対象構造物の型式・大きさ、氷盤への貫入速度、氷厚等の条件から氷盤破壊パターンを推定し、適切な歪領域と歪速度を選択する必要がある。

なお、本研究は（社）日本海洋開発産業協会から受託した氷荷重に関する中規模野外実験において実施されたものであり、ここに関係各位に対して謝辞を表するものである。

<参考文献>

- (1) 酒井雅史、青島正和、勝井秀博、竹内貴弘、河村宗夫、松下久雄、高脇透、寺島貴志、佐伯浩（1997）：「中模野外実験における構造物と氷盤の相互作用時の氷盤歪領域について」第22回海洋開発シンポジウム、1997年6月
- (2) 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、中澤直樹、平山健一、佐伯浩（1997）：「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）」、第22回海洋開発シンポジウム、1997年6月
- (3) Sanderson.T.J.O:Ice Mechanics,Risks to Offshore Structures,1988
- (4) 社団法人 日本海洋開発産業協会（1997,1998）：平成8,9年度海洋構造物に及ぼす氷荷重に関する研究成果報告書