

中規模野外実験における構造物と氷盤相互作用時の氷盤歪領域について

Measurements of Strain Range of Ice Sheet under Ice-Structure Interactions
in Medium Scale Field Indentation Tests酒井雅史*¹・青島正和*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*⁶Masafumi Sakai, Masakazu Aoshima, Hidehiro Katsui, Takahiro Takeuchi, Muneo Kawamura,
Hisao Matsusita, Tohru Takawaki, Takashi Terashima and Hiroshi Saeki

A study on ice loads under ice-structure interactions started in 1993 as a Japan Ocean Industries Association (JOIA) project. Medium Scale Field Indentation Tests (MSFIT) was conducted in winters in 1996 and 1997, which include ice indentation tests, tests on physical properties of ice sheet and measurements of ice sheet deformation.

The paper describes the results of measurements of ice sheet strain using strain gages and the estimation of the strain range under ice - structure interactions obtained at a winter test in 1997.

Keywords: ice sheet deformation, strain range, strain rate, contact area

1. はじめに

構造物と氷盤との相互作用において発生する氷荷重は、氷盤の貫入速度と歪の影響範囲で定義される歪速度に大きな影響を受けることが知られている。したがって歪速度（歪の影響範囲）の評価は氷荷重を推定し、構造物の設計荷重を評価する上で重要な課題となる。しかしながら、これまで氷盤と構造物の相互作用時に生じる氷盤への歪の影響範囲についてはさまざまな説があり、その範囲を合理的に評価した理論は確立されていないのが現状である。

本研究は中規模野外実験において、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、氷盤載荷時の歪データを計測することにより氷盤での歪の影響範囲および歪分布状況の把握を行い、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. 既往の理論

歪速度による破壊の形態には、歪速度の遅い領域（ダクタイル破壊領域 $\dot{\epsilon} \leq 10^{-4}$ ）、歪速度の速い領域（ブリットル破壊領域 $\dot{\epsilon} \geq 10^{-2}$ ）及びその中間の歪速度領域（トランジション破壊領域 $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ ）が存在する。これまでの研究によれば、この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。しかしながら、氷盤に発生する歪の影響範囲については以下に示すような諸説が論じられており、構造物幅または氷厚を基準とした定義付けが行われている。

以下に、既往の歪速度（歪領域）に関する主な提案を紹介する。

(1) Korzavin (1962)

$$\dot{\epsilon} = v / 2b$$

ここに、 v ：剛板への載荷速度（相対速度）、 b ：剛板の幅（構造物の幅）

(2) Michel & Toussaint (1977)

$$\dot{\epsilon} = v / 4b$$

ここに、 v ：載荷速度（相対速度）、 b ：幅（構造物の幅）

これらの式は一般に歪速度を評価する場合に使用されており、構造物と氷盤の相互作用時に生じる氷盤の歪領域は構造物の幅 b を基準に $2b \sim 4b$ 程度と定めている。これらの式の適用範囲は、構造物に対する氷盤の載荷速度が小さく（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。

*¹ 正会員 大成建設（株）技術研究所（245 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

これらの提案式に対して平山らは、氷厚を考慮した歪速度の算定式を提案している。

(3)Hirayama et al.(1974)

$$\dot{\epsilon} = 3.05 v^{1.45} d^{-0.25} h^{-0.6}$$

ここに、 v ：载荷速度（相対速度）、 d ：径（構造物の幅）、 h ：氷厚

上記の式より、相対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、氷盤の変形は氷厚の影響に関係するため、歪速度は氷厚が影響するとしている。

上記の提案式その他、Kry(1981)、Kato & Sodhi (1983)、Sodhi & Morris (1985)らも構造物の幅（径）に比べて氷厚が小さい場合には、構造物の幅（径）よりも氷厚のほうが歪速度に及ぼす影響が大きく、氷盤の変形の速さは v/h に関係していることを示している。

3.計測内容

野外実験は昨年度に引き続き北海道網走市能取湖、能取漁港（二見ヶ岡地区）の港内で、平成8年12月～平成9年3月の期間中に行われた。野外実験は氷盤貫入試験を中心に、物理試験、氷盤の歪計測から成り立っている。歪の計測は歪ゲージを氷盤内に埋め込み、図-1の計測状況概要に示すように氷盤载荷時の歪データを計測した。歪ゲージデータはターミナルボックスを中継して直接パソコンに取り込み、データ処理を行った。貫入試験では、貫入盤先端部に取り付けたロードセルの荷重データを10cm幅の分割パネル毎に取得し、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等の物理特性試験を行った。

4.計測方法

氷盤の歪計測の準備として、貫入試験に先立ち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の近い素材で覆った防水型を用い、ゲージ表面に加工を施して、氷盤との付着が良好になるような工夫を行った。歪ゲージは氷盤内への埋め込みが容易に行えるように塩ビ製のL字型取り付け治具に固定し、氷厚の中間位置に埋め込み 2～3日間養生を行った。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の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伝播範囲（または距離）が把握できるように载荷方向に対して配置を狭めた直線的な配列とした。

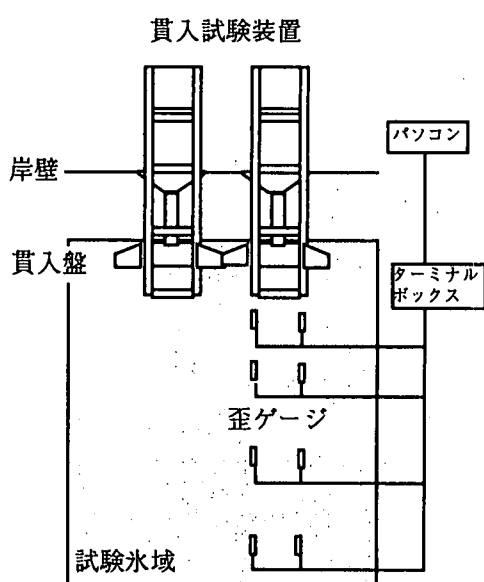


図-1 計測状況概要

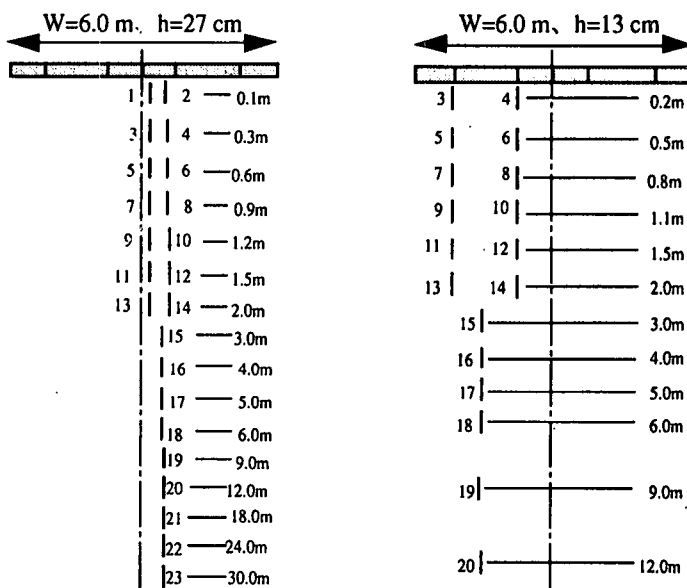


図-2 歪ゲージ配置図

5.計測ケース

氷盤歪の計測は、表-1 に示す中規模野外実験の2 ケースに対して行った。

表-1 計測ケース

実験ケース	貫入盤幅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/s)
1	6.0	27.0	1.62	22.2	1.2
2	6.0	13.0	0.78	46.2	1.2

6.計測結果と考察

貫入試験により発生する氷盤の歪計測結果を以下に示す。氷盤の破壊状況としては、貫入盤の氷盤への貫入に伴い、貫入盤との接触面で圧縮破壊を起し、塑性破壊を繰り返すのが観測された。このような状況では貫入盤と接触寸前の歪ゲージの計測値はスケールアウトし計測不能となっている。

(1) 全氷力と歪の系時変化

図-3、図-4 に各ケースの全氷力と歪の系時変化を示す。全体氷荷重は、貫入開始直後に上昇し、ピーク値を示す。

これは初期氷力と呼ばれ、貫入開始時の氷盤先端部と貫入盤先端部の接触状態に依存する。初期氷力の最大値発生後は、氷力は減少し、初期氷力を超えることのない変動を伴った氷力が発生する。これは継続氷力と呼ばれ、氷盤の局所的な破壊と関連して生じる。歪の計測は、載荷開始直前から貫入盤を後退させ荷重を除荷した直後まで計測を行った。歪はマイナスが圧縮、プラスが引張として示した。

図-3 はケース1の計測結果を示す。ケース1では貫入盤のほぼ中央部の約50cm幅で歪ゲージを直線的に配置し、歪の伝播範囲の把握を行った。初期最大氷力発生時には、歪は氷力と同時に最大値を示し、貫入盤幅の5 倍の範囲まで到達している。継続氷力発生時には、載荷の影響により歪が徐々に増加する傾向にあり、氷力の増加傾向とはほぼ同様の変動を示した。

また、試験終了後、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およそ2~5倍離れた領域（歪の伝播範囲）では、弾性変形が生じていることがわかる。

図-4 はケース2の計測結果を示す。ケース2では、貫入盤幅の半分の領域に歪ゲージを配置し、歪の伝播範囲と歪の平面的な広がり の把握を行った。初期最大氷力発生時および継続氷力発生時ともにケース1と同様の変動傾向を示した。また、歪の平面分布で貫入盤から同一距離にある歪を比較すると、中央部に発生する歪は外側の歪よりも大きいことがわかった。

(2) 歪の平面分布

図-5 は、ケース2について初期最大氷力発生時および継続氷力発生時の歪の平面分布を示したものである。歪コンタは貫入盤に作用する氷荷重データが盤の左右ではほぼ同様の変動傾向を示していることから、貫入盤の片側で取得した歪データを内挿して示した。氷盤への載荷に伴い、氷盤内を歪が伝播する状況が確認できる。初期最大氷力発生時には圧縮歪が発生し、歪の影響範囲が貫入盤幅の2 倍程度まで及んでいる。歪は初期ピーク後にいったん低下するが完全には戻らず、継続氷力発生時に再び増加し、氷盤内を伝播して広がっていくのがわかる。また、継続氷力発生時(4)、(5)では氷盤内の歪に引張が生じているが、これは氷盤が隆起または沈降したためと考えられる。

(3) 歪領域について

計測結果より、氷盤の歪領域は貫入盤幅をWとするとおよそ5W程度まで及ぶことが計測より明らかとなった。ここでは、氷盤の歪の伝播範囲（構造物からの距離）について、最大氷力が発生するまで氷盤が弾性変形するものと仮定し、歪領域の推定を試みた。

氷盤に発生する歪 ϵ は以下の式により求めることができる。

$$\epsilon = \sigma / E = (F / W h) / E = \Delta L / L$$

ここで σ ：氷圧力、E：ヤング率、F：全氷力、W：構造物幅、h：氷厚、 ΔL ：水平変形量、L：歪領域
ただし、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。

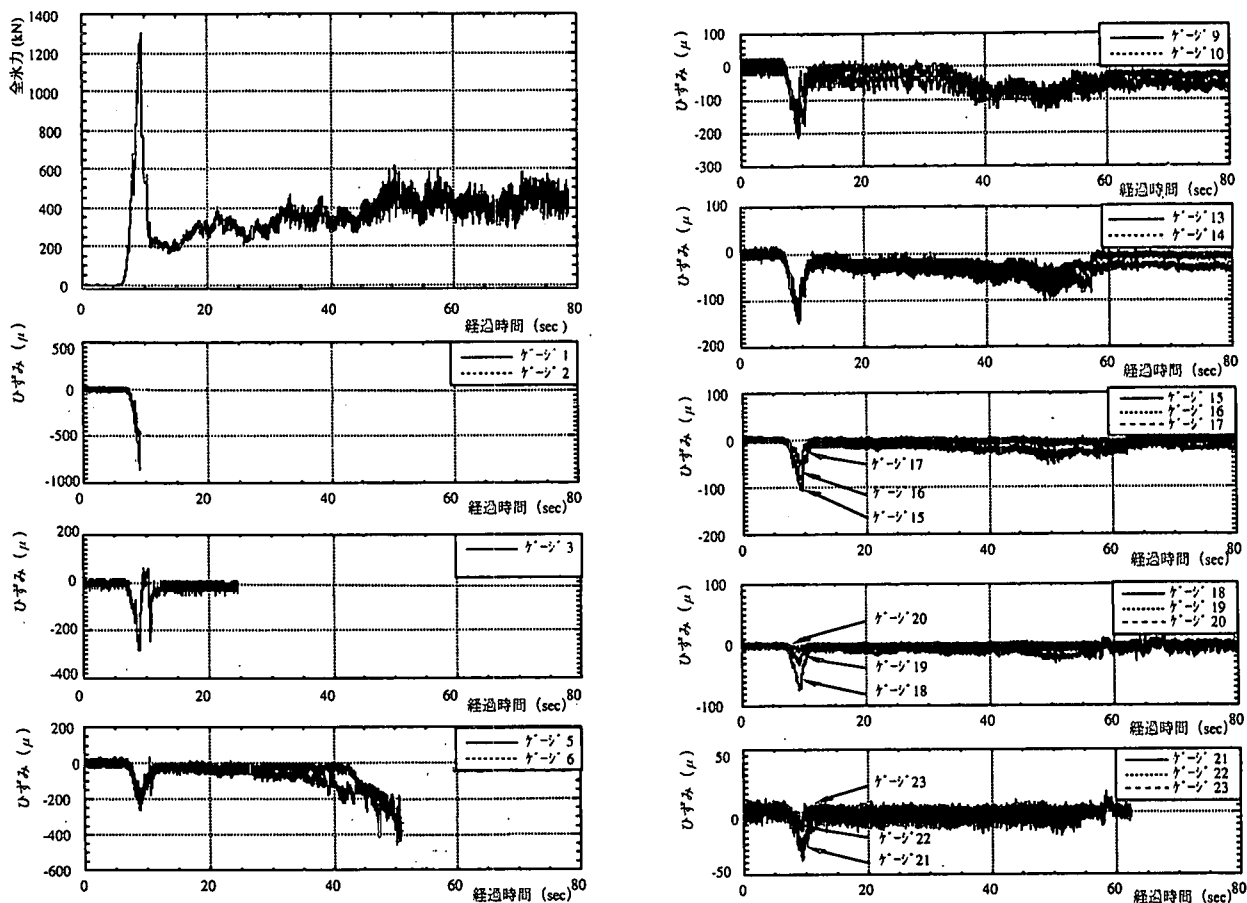


図-3 全氷力と歪の系時変化 (貫入盤幅 $W=6.0\text{m}$ 、氷厚 $h=27\text{cm}$)

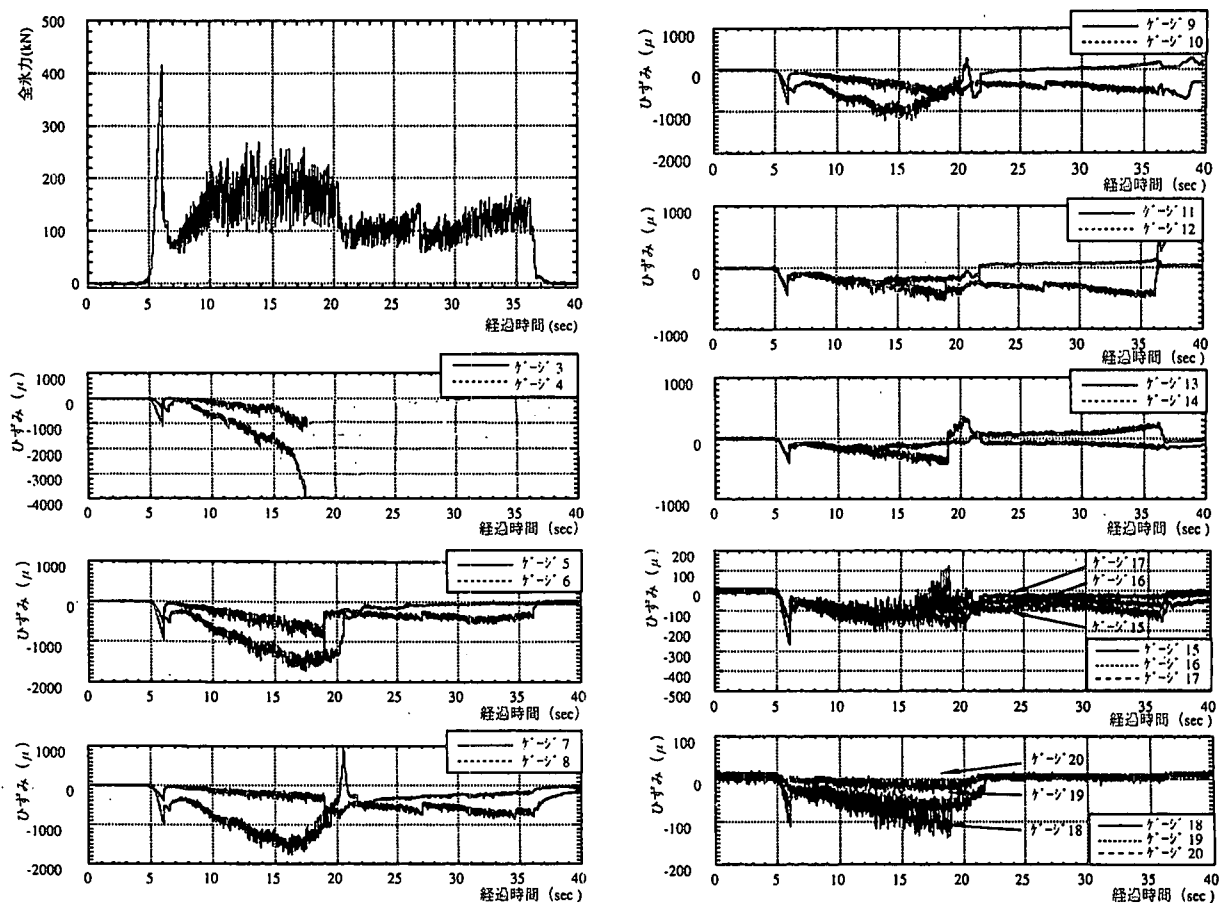


図-4 全氷力と歪の系時変化 (貫入盤幅 $W=6.0\text{m}$ 、氷厚 $h=13\text{cm}$)

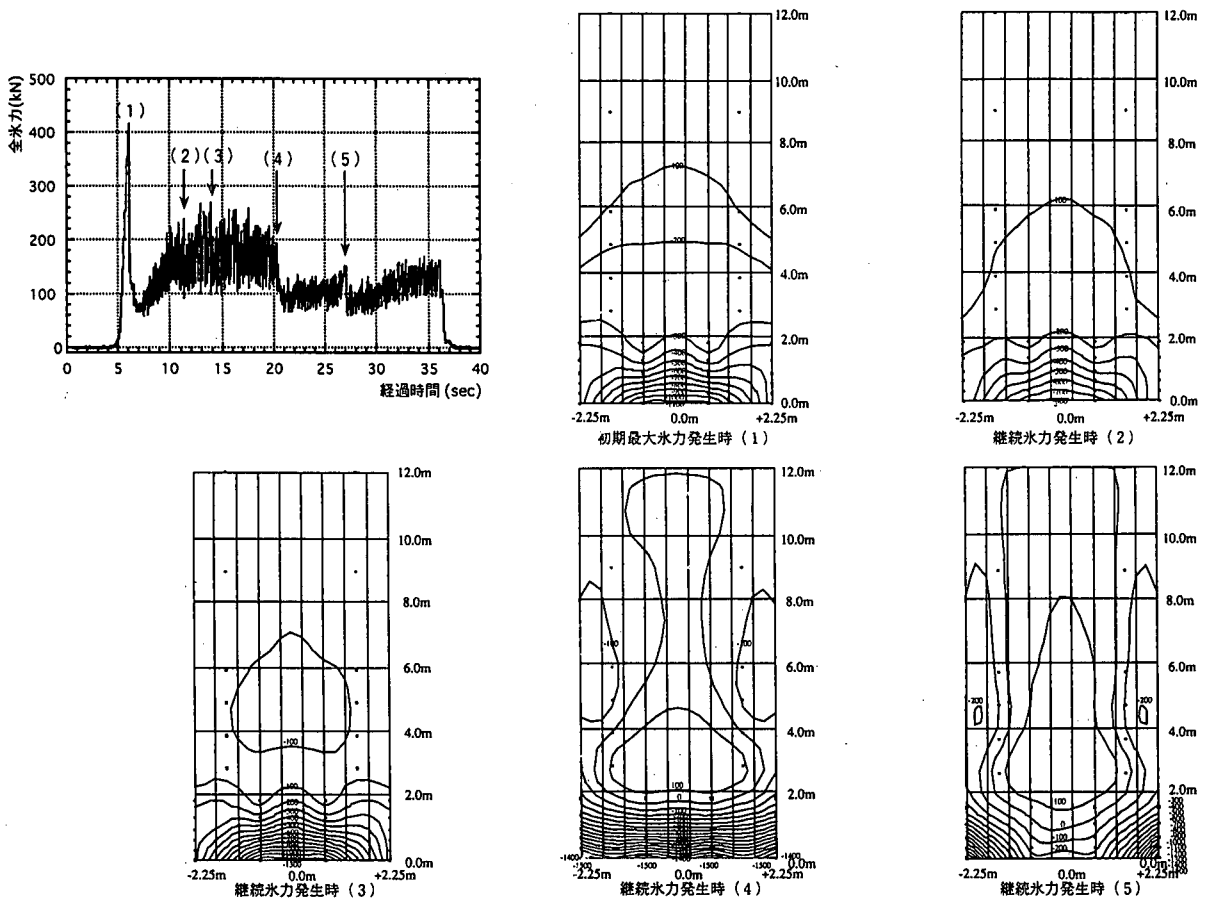


図-5 歪の平面分布 (貫入盤幅 $W=6.0\text{m}$ 、氷厚 $h=13\text{cm}$)

初期全水力発生時の荷重データから上記算定式を用いると、歪領域 L はケース1 ($W=6.0\text{m}$, $h=27\text{cm}$) の場合 $L=9.9\text{m}$ 、ケース2 ($W=6.0\text{m}$, $h=13\text{cm}$) の場合 $L=6.1\text{m}$ となり、貫入盤幅の約1~1.6倍という結果が得られた。

この算定値と実測値との違いは、貫入盤と氷盤の受圧面積に影響するものと考えられる。すなわち、氷はコンクリートや鋼のように均質な材料ではなく、また氷盤の破壊様式から載荷時に常に貫入盤に対して氷盤すべてが接触しているとは考えにくい。したがって、実測値との比較を行う場合には、上記算定式中の受圧面積 Wh は算定式よりも小さく評価する必要がある。氷盤のヤング率は一定であるため、受圧面積が小さくなると氷圧力 σ は増加し、それに伴い歪は大きくなる。ただし、この歪は歪領域 L の範囲内の氷盤に一律に作用すると考えた場合の平均的な歪である。実際の現象としては貫入盤からの距離が離れるとともに歪が徐々に減少していくことから、平均的な歪が増加すると歪の伝播範囲は広がるものと推測される。

初期最大水力発生時に生じる平均的な氷盤の歪を、実測した全水力に基づく水平変形量と歪の伝播範囲から算定すると、ケース1で 1000μ 、ケース2で 1300μ 程度となり、これらの値は貫入盤と氷盤の接触面近傍に発生する歪と比較的一致しているという結果が得られた。

しかしながら、実際の氷盤は粘弾性体としての特性を有しており、氷盤のすべての状態に対して弾性理論を適用して歪の問題を取り扱うことには無理が生じる。また、上記の受圧面積やヤング率を評価する際には水の結晶構造、水温、貫入速度等の影響を考慮する必要があると考えられる。

7. 既往の理論との比較

歪領域については、貫入盤幅を W とすると各ケースともに、既往理論 (1) および (2) で論じられている歪の伝播範囲の $2W$ 、 $4W$ よりも広く、およそ $5W$ 程度まで及ぶことが計測より明かとなった。しかしながら、今回の実験では、貫入盤幅に対して氷厚がおおよそ $1/50 \sim 1/20$ となっており、氷厚が小さい場合には構造物の幅 (径) よりも氷厚のほうが歪速度に及ぼす影響が大きいという既往理論から、氷厚の影響を無視することはできない。そこで歪速度の算定式として、実験条件の $v/2W$ 、実測値による $v/5W$ 、氷厚だけを考慮した v/h 、氷厚と貫入盤幅を考慮した v/Wh 、平山らの理論を示し、比較を行った。

表-2 歪速度の評価

実験ケース	$v/2W$	$v/5W$	v/h	v/Wh	平山らの理論
1	1×10^{-3}	4×10^{-4}	4.4×10^{-2}	7.4×10^{-5}	1.1×10^{-1}
2	1×10^{-3}	4×10^{-4}	9.2×10^{-2}	1.5×10^{-4}	1.7×10^{-1}

この結果より、実測値に基づく歪速度の算定では 10^{-4} オーダーとなり、歪速度の範囲がトランジション領域からダクティル領域にシフトしてしまう。また、氷厚だけを考慮した場合および平山らの理論ではブリットル領域氷厚と貫入盤幅を考慮した場合はダクティル領域となる。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で、歪領域と氷厚の影響を考慮した算定式の確立が望まれる。歪速度を算定する場合の歪領域と氷厚の影響については、今回の結果から論じることは困難である。今後はより多くの実験ケースに対して、できる限り広範囲に高精度で連続的な測定が可能な方法を用いて計測を行い、既存の研究成果との比較検証を行っていく必要がある。

8. まとめ

- (1) 歪領域は、貫入盤幅を W とすると既往理論 (1) および (2) で論じられている歪の伝播範囲 $2W$ 、 $4W$ よりも広く、およそ $5W$ 程度まで及ぶことが明らかとなった。
- (2) 氷盤に発生する歪は全体氷力（初期氷力、継続氷力）と対応して変動する。
- (3) 氷盤の破壊は貫入盤近傍では塑性破壊が生じ、貫入盤から貫入盤幅のおよそ $2 \sim 5$ 倍離れた領域では弾性変形が生じること計測より明かとなった。これは貫入盤を後退させ荷重を除荷したときに歪が元に戻ろうとする傾向にあることから推察される。
- (4) 最大氷力が発生するまで氷盤が弾性変形するものと仮定し歪領域を算定すると、貫入盤幅の約 $1 \sim 1.6$ 倍という結果が得られた。算定値と実測値の違いは歪が構造物と氷盤との受圧面積の影響を大きく受けるためと考えられる。
- (5) 歪速度の評価では、既往の理論に対して歪領域と氷厚の影響を考慮して比較を行う必要がある。

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) 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（1996）：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、第21回海洋開発シンポジウム
- (2) Sanderson, T.J.O: Ice Mechanics, Risks to Offshore Structures, 1988
- (3) 社団法人 日本海洋開発産業協会：平成8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