

複数破壊領域における氷荷重の推定法に関して

ICE LOAD OF MULTI ICE FAILURE ZONES

竹内 貴弘¹、佐々木幹夫¹、赤川 敏²、河村 宗夫²、酒井 雅史³、
松下 久雄⁴、寺島 貴志⁵、中沢 直樹⁶、木岡信治⁷、佐伯 浩⁸

Takahiro TAKEUCHI, Mikio SASAKI, Satoshi AKAGAWA, Muneo KAWAMURA, Masafumi SAKAI,
Hisao MATSUSHITA, Takashi TERASHIMA, Naoki NAKAZAWA, Nobuharu KIOKA and Hiroshi SAEKI

¹正会員 工博 八戸工業大学土木工学科、²正会員 Ph. D 清水建設株式会社技術研究所

³正会員 工修 大成建設株式会社技術研究所、⁴正会員 工博 三井造船(株)

⁵正会員 工博 パシフィックコンサルタンツ株式会社北海道支社、⁶正会員 工博 (有)フォレストワークス

⁷正会員 工修 北海道大学大学院工学研究科、⁸正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科

The paper introduces the method which calculates ice load of multi-ice- failure zones from that of single failure zone. The method is based on correlation coefficient of a pair of ice loads on a single failure zone, in addition to auto-correlation coefficient of ice load on a single failure zone. Non-uniform contact of an ice sheet with a structure and statistical distribution of strength of natural ice are considered using ice load data obtained in the JOIA project.

Keywords: Weibull distribution, Log-normal distribution, non-uniform contact,
multi-ice- failure zones

1. はじめに

サハリン北部沖合での資源開発の必要性から、平成5年度より(社)日本海洋開発産業協会(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」(JOIA Report;1996, 1997, 1998)¹⁾が実施されている。ここでは、海洋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合理的な荷重推定法を開発整備することが求められている。実際には、大型構造物模型を用いた実験を実施することは困難であるため、実施可能な試験条件(室内・中規模)で得られた荷重から、所定の大きさの構造物に作用する荷重を推定(外挿)することが必要となり、推定プログラムの開発

も別途W/Gとして実施されてきた。標記プロジェクトにおいては、構造物への貫入面積に対する氷荷重のスケール効果の検討がその根幹をなしている。これに関しては、Kry(1978)²⁾によって示された、幅広構造物と氷板の相互作用は非同時破壊と非一様接触で特徴づけられるという“複数破壊領域”の概念に因るところが大きい。そして、単一破壊領域の荷重時刻歴の確率特性を調べ、3つの仮定条件から複数破壊領域の氷荷重計算モデルが提案されている。この“複数破壊領域”の概念は、今なお氷荷重のスケール効果に関する研究の基礎となっているが、計算モデルにおいては、単一破壊領域の荷重相互間の関係が示されていないく、また、仮定条件にも問題が

残されている (Takeuchi et al., 1999) ³⁾。本研究では、実海水を用いて実施した「中規模野外実験」の平成7年度の計測結果を用い、新たな氷荷重の推定方法を検討してみた。ここでは、所定の大きさの構造物に作用する荷重を算定するために、単一破壊領域の氷荷重時刻歴から複数破壊領域の氷荷重を推定する方法を検討したので報告する。

2. 中規模野外実験の概要

中規模野外実験は、平成8年1月から本年3月までの冬期間、北海道網走市能取湖の能取漁港二見ヶ岡地区の港内において実施されてきた。これまでの成果の一部は、既に報告済み (竹内ら ⁴⁾、1996；赤川ら ⁵⁾、1997) である。中規模野外実験は、海洋構造物の模型 (以下、供試模型) を所定の氷厚 (h) に達した天然氷の試験氷板中に護岸を反力として貫入させ、その時の氷板破壊に必要なとされる荷重を計測するものである。荷重は、供試模型前面に主に幅10 cm (端部は、5 cmの場合有り) の分割パネルを取り付け、その背後にロードセルを連結することにより計測される。したがって、分割パネル毎の局部氷荷重およびそれらの総和として全体氷荷重を評価できる (図-1、図-2；氷荷重の計測例)。ここでは、表-1 に示す中規模野外実験の結果を用いた。

表-1 試験条件					
試験日 (H7:	供試模型	氷厚	貫入速度	圧縮強度	分割パネ
平成7年度)	幅 W (m)	h (cm)	V (mm/s)	σ_c (Npa)	ル枚数
H7-2-20	1.5	12	3.04	1.43	15枚
H7-2-21	3.0	12	6.08	1.83	31枚
H7-2-07	3.0	24	6.11	2.09	31枚

3. 複数破壊領域の氷荷重

単一破壊領域の氷荷重時刻歴から複数破壊領域の氷荷重を計算することを検討する。図-3 に示すように、氷板と構造物の相互作用を考える。実際の海域では、氷板先端部分の形状が直線状に一樣であることはない。これは、氷板の移動が小さい港内での計測結果からもその非一樣性が報告されている

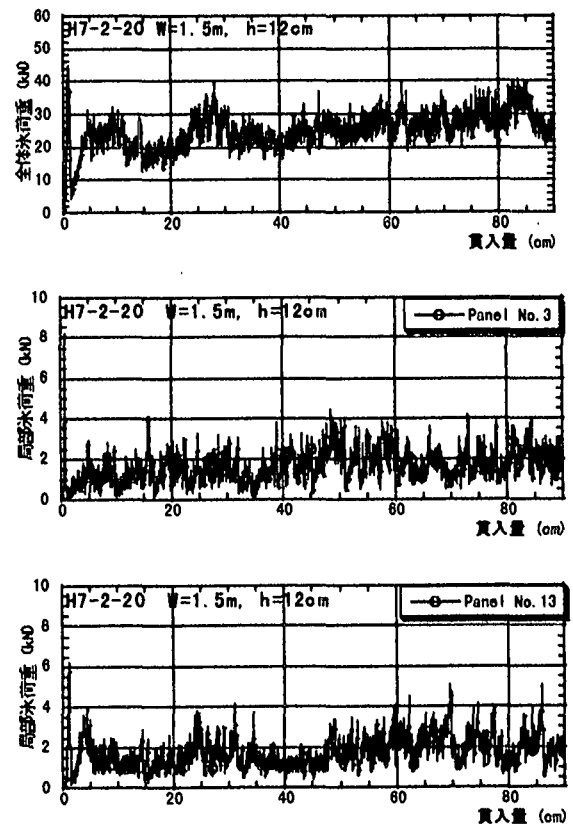


図-1 全体及び局部氷荷重の計測例 (H7-2-20)

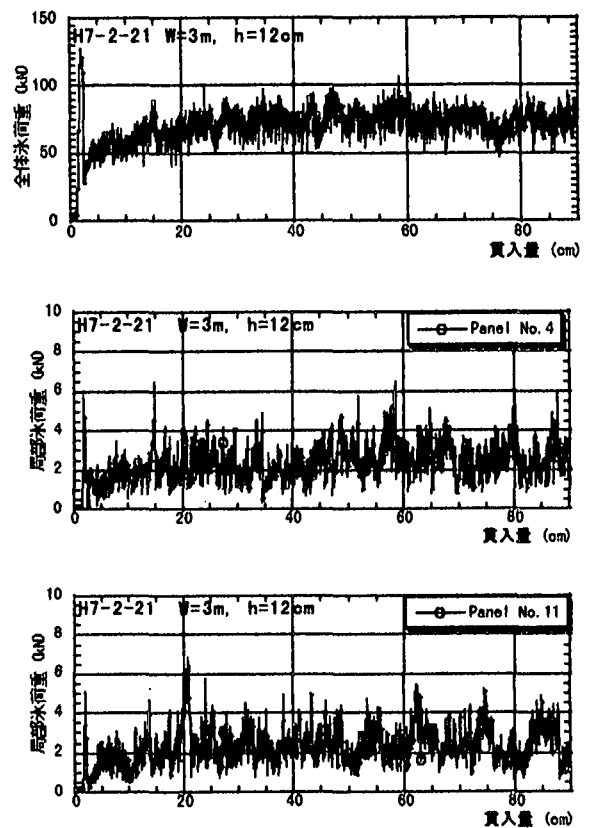


図-2 全体及び局部氷荷重の計測例 (H7-2-21)

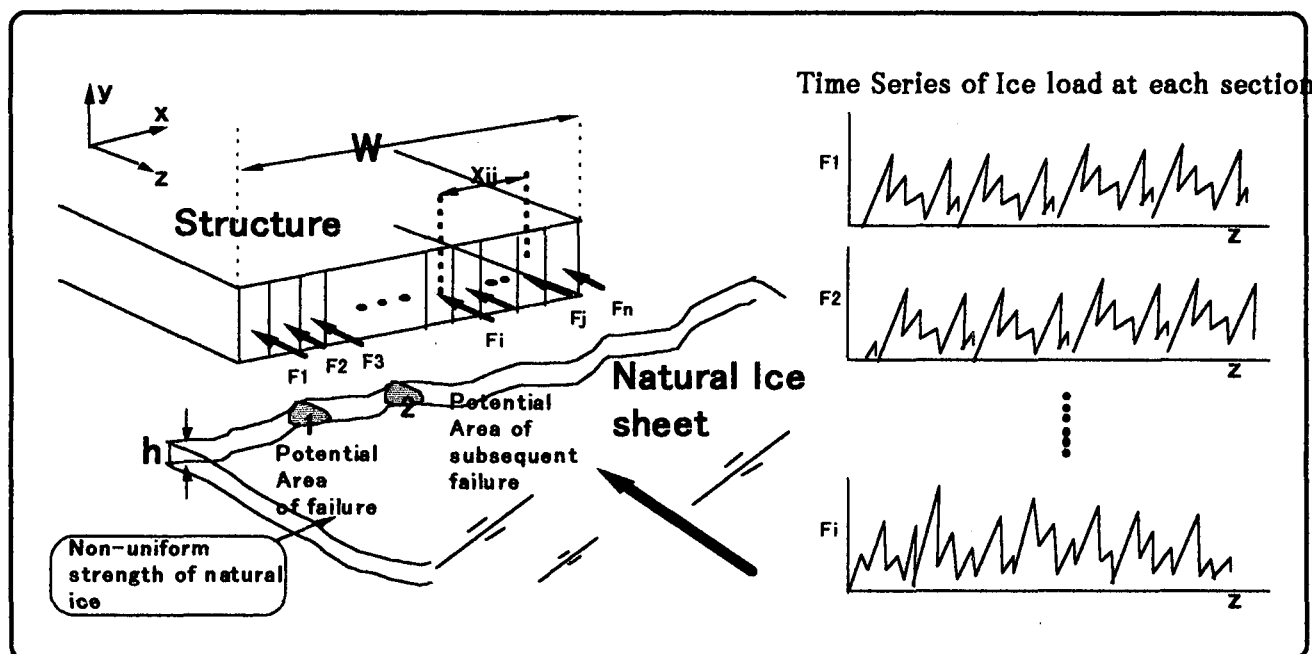
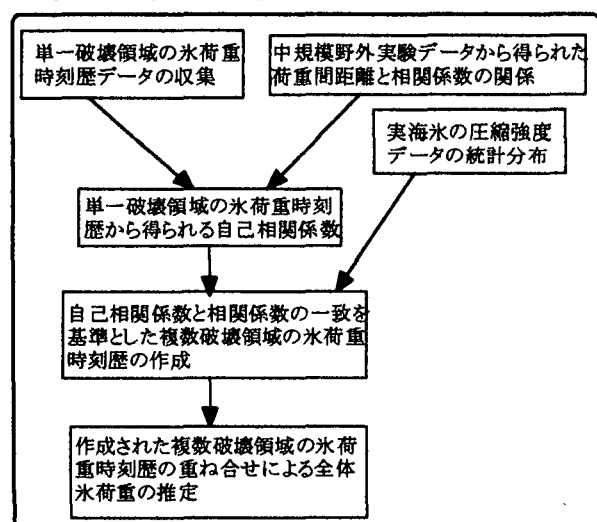


図-3 氷板と構造物の相互作用概念図

(Takeuchi, Akagawa and Saeki, 1998) ⁶⁾。このために、現実の海域では、氷板の凸部分の状態に応じて構造物と相互作用し、複数の領域で接触、破壊を繰り返すこととなる（図-3）。このような、相互作用過程で発生する全体氷荷重を表-2 に示す flow に従い計算を試みた。この場合には、少なくとも単一破壊領域での氷荷重時刻歴が必要となる。

表-2 複数破壊領域の氷荷重計算 Flow



初めに、中規模野外実験において、各パネルに作用する荷重間相互間の相関係数(C_o)を計算する。

また、それらの荷重相互間距離(X_{ij})を氷厚(h)で無次元化した(X_{ij}/h)との関係を調べたものを図-4 と図-5 に示す。 (X_{ij}/h) の増大に伴い(C_o)が急激に減少し、ゼロ近傍に漸近していく。これは、各パネル前面の氷板の破壊現象が、ある距離離れると無関係に発生することを示している。この破壊が無関係になる距離は、氷厚(h)と密接に関連があるが、図-4 と図-5 より($C_o=0$)になるまでには、急激といえどもある減少区域が必要であるために、一義的に大きさを決定することは困難である。また、貫入試験後の破壊氷片のフルイ試験結果（図-6）は、2次破壊の影響を含んではいるが、氷片の破壊サイズには“分布”があることが分かる。そして、氷厚(h)が大きくなると破壊氷片のサイズが大きくなる傾向がある。さらに、荷重時刻歴の卓越周波数から計算される破壊氷片長さを計算した場合でも氷厚付近の値を与えることから、ここでは、単一破壊領域の大きさを氷厚(h)として後の計算を実施した。

次に、単一破壊領域の氷荷重時刻歴の自己相関係数(A_c)を計算し、時間遅れを貫入ズレ長さ(dZ_i)とし氷厚(h)で割った値(dZ_i/h)との関係を図-7 と図-8 に示す。図-3 に示す複数領域での非同時的な荷重伝達を、単一破壊領域の時刻歴から再現する

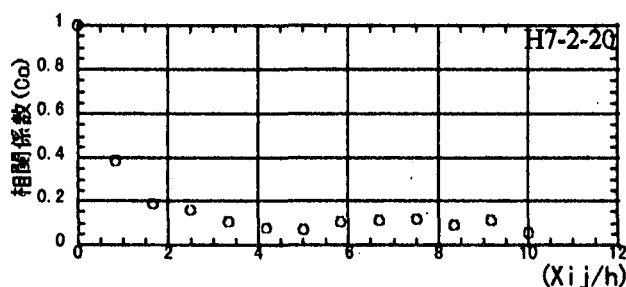


図-4 (Co)と (Xij/h)との関係 (H7-2-20)

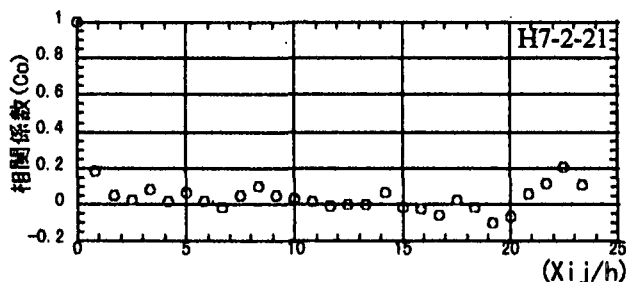


図-5 (Co)と (Xij/h)との関係 (H7-2-21)

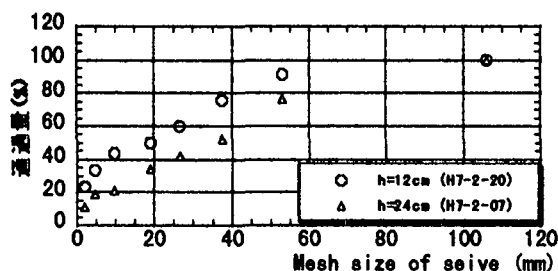


図-6 破壊氷片のフルイ試験結果

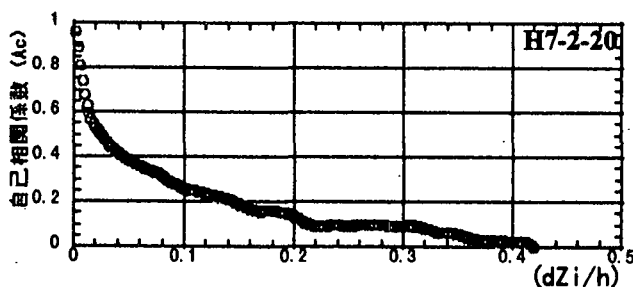


図-7 (Ac.)と (dZi/h)との関係 (H7-2-20)

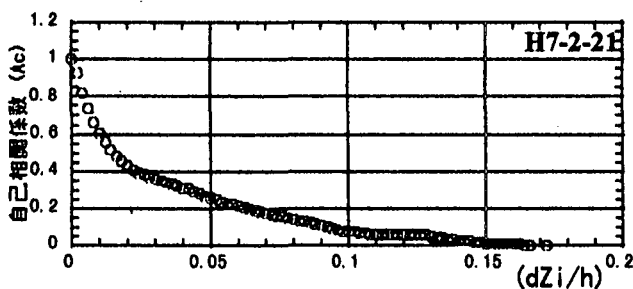


図-8 (Ac.)と (dZi/h)との関係 (H7-2-21)

ために、図-7と図-8の(Ac vs. dZi/h)と図-4と図-5の(Xij/h vs. Co.)の関係に対して、(Ac=Co)という条件の下に、貫入ズレ長さ(dZi)を考慮して、基準となる荷重時刻歴から(Xij)離れた荷重時刻歴とした。計算では、各図の近似式を用いている。この操作から、計算に必要な複数の荷重時刻歴を作成した(図-9参照)。

次に、天然海水の圧縮強度には多くのばらつきがあることが佐呂間湖の天然海水を用いた圧縮強度試験結果から示され、そのばらつきは対数正規分布(3母数)で近似できると報告されている(竹内、赤川、岩井、1995)⁷⁾。中規模野外実験においても貫入試験氷から採集して行った圧縮試験データの統計解析から適切な確率分布を求めた(JOIA Report、1998)¹⁾。以下に示す対数正規分布(3母数)及びWeibull分布(3母数)が高い近似度を与えている。

1) 対数正規分布(3母数) - 確率密度関数 $[f_u(x)]$

$$f_u(x) = \frac{1}{\{(x-a) \times \sigma_y\} \times (2\pi)^{0.5}} \times \exp \left\{ -\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right\} \quad \text{---(1)}$$

母数は、平均値 $\mu_y=1.12$ 、標準偏差 $\sigma_y=0.17$ 、 $a=-1.62$ を用いた。

2) Weibull 分布(3母数) - 確率密度関数 $[f_{wv}(x)]$

$$f_{wv}(x) = \left\{ \frac{a}{(b-c)} \right\} \times \left\{ \frac{x-a}{b-c} \right\}^{b-1} \times \exp \left\{ -\frac{(x-c)}{(b-c)^a} \right\} \quad \text{---(2)}$$

母数は、 $a=2.13$ 、 $b=1.64$ 、 $c=0.39$ を用いた。

さらに、図-9(Step 1)で既に作成されている複数の荷重時刻歴に対して、(Step 2)に示すように上記の2つの確率密度関数に従う乱数を発生させ係数(Ki)を(Step 1)の荷重時刻歴に乗することで修正を行った。この操作により新たに作成された単一破壊領域の荷重時刻歴相互間の相関係数(Co)の値に変化はない。このようにして、(n)個の領域における氷荷重時刻歴を複数作成し、それらを単純に重ね合わせることで全体氷荷重を計算する。計算に用いる荷重時刻歴の長さは、x-z平面での氷板

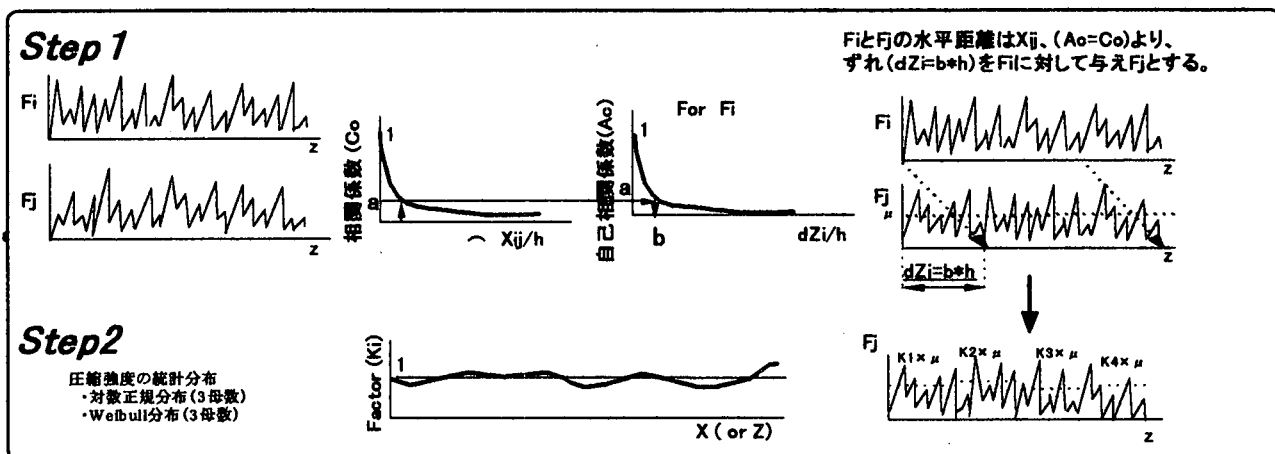


図-9 複数破壊領域での荷重時刻歴の作成

強度の効果を一樣にするために、単一破壊領域の大きさである氷厚相当の貫入量を実験データから任意抽出して用いた。そして、ここでは、($n=10, 20, 30, 40, 50$) の場合について計算し、それぞれにおいて各 1000 回の繰り返し計算を行い、平均値と最大値を算定した。 $(n=50)$ を最大にとったのは、氷板の破壊様式が Crushing から buckling へと変化する範囲を考慮したためである(加藤, 1985)⁸⁾。これらの計算結果と実験結果を比較したものを図-10と図-11に示す。ここでは、横軸は(n)の値から貫入面積に変換して作図してある。平均値は、両結果とも一定値を示し対応している。最大値は、両結果とも徐々に減少する傾向を示し定性的には対応するが、計算結果の方が大きい値を与えている。これは、単一破壊領域の大きさを一定としたことに起因していると推測しており、単一破壊領域のサイズ分布の効果に関する検討が必要である。また、図-10と図-11の比較に用いたデータは、計算、実験ともに供試模型端部の氷荷重時刻歴を取り除いて比較してある。この端部では、横方向(x)の拘束により圧力が増大するためである。

4. 主な結論

(1) 単一破壊領域の大きさには分布があるもののその代表値は、荷重相互間の相関係数(C_o)と水平距離(X_{ij})の関係(X_{ij}/h vs. C_o)、及び同時に実施した破壊氷片のフルイ試験結果からほぼ氷厚程度

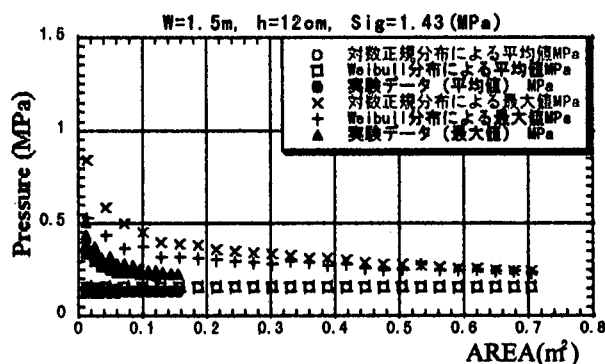


図-10 貫入面積と氷圧力の関係 (H7-2-20)

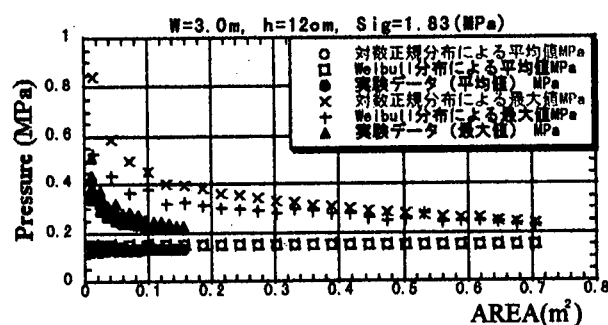


図-11 貫入面積と氷圧力の関係 (H7-2-21)

である。

(2) 単一破壊領域の荷重時刻歴を基に、(X_{ij}/h vs. C_o)と(dZ_i/h vs. A_o)の関係から、氷板の非一様な接触状態を考慮した新たな複数領域での荷重時刻歴

を再現する方法を示した。

(3) さらに、天然氷の強度分布は、3 母数の Weibull と対数正規分布で近似可能であり、これらを上記の手法に加える方法を示した。

(4) (1)～(3)の関係をを用いて、氷板の非一様接触と強度分布を考慮し、貫入面積と氷荷重との関係を全氷荷重実験データと比較しその対応性を示した(図-10, 図-11)。これにより、単一破壊領域の荷重時刻歴が与えられると、任意の大きさの複数領域での荷重を計算できる。

今後は、貫入速度が遅く氷板同時変形が発生する場合の検討や氷厚増大による拘束増加に起因する氷圧力の上昇効果の検討が重要である。これらは、今年度実施した野外試験のデータより評価が可能である。

謝辞 : 本研究で使用したデータは、(社)日本海洋開発産業協会(JOIA)からの委託研究において実施されたものである。また、悪環境条件下での現場データの取得にあたっては、島田建設(株)及び各計測作業員の方々に多大な協力頂いた。記して感謝の意を表します。

<参考論文>

1) JOIA REPORT 社団法人日本海洋開発産業協会 1996, 1997, 1998.

2) Kry, P.R. : "A statistical prediction of effective ice crushing stress on wide structure," Proc. 4th IAHR,

part1, pp.33-47, 1978.

3) Takeuchi, T., Jyumonji, S., Isida, O. and Sasaki, M. : "On the Comparison of the Assumption of Kry Model with MSFIT data," Reifs Workshop, pp. 293~300, 1999.

4) 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 Vol. 12、pp. 379-384, 1996.

5) 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 Vol. 13、pp. 771-776, 1997.

6) Takeuchi, T., Akagawa, S. and Saeki, H. : "Significance of Ice Sheet's Leading-Edge Roughness in Relation to Ice Load," International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 161-166, 1998.

7) 竹内貴弘、赤川敏、岩井俊之 : 「現地海氷盤の強度分布特性」、海洋開発論文集 Vol. 11、pp. 241-245, 1995.

8) 加藤一行 : 「垂直壁を有する氷海構造物に作用する氷荷重について」、第 10 回海洋開発シンポジウム、pp. 62-67, 1985.

(1999. 4. 19 受付)