

海底地盤と海氷の相互作用に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON INTERACTION BETWEEN SEA ICE AND SEA BED

木岡信治¹・安部慎也¹・佐々木久昭²・浜名靖博²・佐伯浩³

Shinji KIOKA, Shinya ABE, Hisaaki SASAKI, Yasuhiro Hamana and Hiroshi Saeki

¹学生会員 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 島田建設株式会社 工事部(〒093-0032 網走市港町8番地1)

³正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 教授(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Ice Scour(Ice Gouging) is a phenomenon in which sea ice(pressure ridge, ice keel) attached to the sea bottom in a shallow sea area scrapes the sea bottom while it is pushed by wind and water current from offshore ice field to shallow sea area. There have been reported instances of damage to transatlantic submarine telecommunication, water intake pipeline at Great Slave Lake etc. So, the problem of Ice Scour by sea ice and ridge keels is of concern in the planning and design of seabed installation.

In this study we describe the mechanism of Ice Scour and obtain basic knowledge necessary to take preventive measures in future against damage by sea ice.

Key words : Ice Scour, sea ice, pressure ridge, ice keel, scour curve, scour depth

1. はじめに

Ice Scour とは風や流れにより沖合いの氷盤から押された氷盤が海底地盤に接触削っていく現象であり、大きな氷荷重が海底地盤に作用する。この現象によりカナダ大西洋沖のTVケーブルが破損されたり、Great Slave Lakeにおける取水パイプラインの破損等の被害例が報告されている。したがって、これらの現象が起こり得る領域に石油、天然ガスパイプライン、取水口等の埋設構造物が存在すれば、その動的、静的な力によってパイプラインの変形、破断、油漏れ等の深刻な被害をもたらすことが予想され、特に近年の氷海域での油田開発はめざましく、これに伴うパイプラインの設計、布設にはこのIce Scourの影響を十分に考慮しなければならない。通常、それ自身Ice Scourによる氷荷重に耐えうることのできるパイプラインの設計は不可能とされ(ボーフォート海では10MNにも及ぶ氷荷重が海底に作用するという試算もある¹⁾、設置場所の選定、予想最大Scour depth(削られ深さ)以下の埋設(Trench、コンクリートトンネル、砂利によるカバーリング等)による保護が考えられるが構造物延長が長い場合には、その設置深さにより大きくコストが相違する。より経済的に設計するにはIce Scourのメカニズムの把握、該当する領域内における最大Scour depthの正確な予想、及び海底地盤の発生応力の見積もりが必要である。本研究においては、簡単なIce Scourの力学モデルを構築しIce Scourの基本的なメカニズム

を把握し、将来的には上述した事柄を達成するための基礎的な知識を得ることを目的とする。

2. Ice Scourの実態(カナダのボーフォート海域)

カナダのボーフォート海ではIce Scourの多くがpressure ridge, Ice keelによるもので、鉛直方向に発達しているクサビ状あるいは峰状の氷塊の部分のことであり、直接海底地盤を削っていく。これらはIce rubbleと呼ばれる破壊された氷片の集合体であり、海水の流入、ブラインの欠落で再凍結されたものである。実際にはこれらのIce Keel部分がそのまま地盤に反映するのではなく、Ice rubbleの境界面で破壊を生じたり、座礁、回転等が生じる場合もあり、Keel部分が長くても大きなScour depthを発生するとは限らない。

Ice Scourの軌跡は、カナダのボーフォート海で多く観測されており、Scour depthは水深、場所によって様々であるが、水深8-30mにおいて数10cm~2m程度^{2) 3)}、観測上の最大値は8.5mに達しているものもある³⁾(2000年前に発生したものと推定)。また水深6m以内、58m以上ではScour depthが1mを超えないという観測結果がある⁴⁾。しかしながら、実際にはimmediate in-filling⁵⁾と呼ばれるScourの最中に削られたberm部分から即座に砂が崩れ埋め戻される現象や、波浪、潮汐、長期の砂の堆積、海水面の変動等により、観測結果が過大あるいは過少評価する傾向にあり、正確なScour depthを観測

することは非常に困難である。また広大な海域、比較的深い水深における調査・観測も莫大なコスト、労力、時間が必要であることを考慮すれば、ある程度系統の実験に頼らざるを得ないのが現状である。

3. 実験

(1) 実験装置及び実験方法

実験は図-1 に示すような装置を用いて行った。水槽の底には一定勾配 ($\theta=1/5, 1/10$ の 2 種類) となるように砂を敷き詰める。実際の海底勾配はこれらより穏やか ($1/1000\sim 1/100$) であるが、ジャッキのストロークの制限上の理由から、よりはっきりと Scouring させるため、あえて急勾配 ($1/5, 1/10$) とした。また、水平方向に 50cm のストロークを有する油圧ジャッキを水槽の一端に固定し、後で示すようなモデル氷盤をその油圧ジャッキの前に取り付け、一定速度 (3 種類、 $V=0.4, 0.9, 1.4\text{cm/s}$) で水平方向にモデル氷盤を押す。油圧ジャッキとモデル氷盤の間にはコネクターとして“FREE”を介した。これは後方から押してくる氷盤の接触状態を模擬している。またロードセルにより水平方向の氷荷重 (砂地盤から受ける水平方向の抵抗力、ここではジャッキで押す力を示す)、同時にモデル氷盤が動き出してから水平距離 Scour length、それによって削られる Scour depth をビデオ解析により測定した。

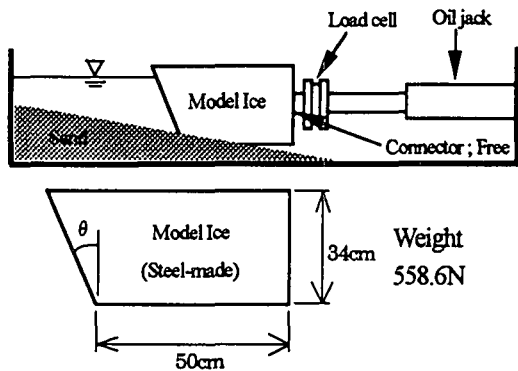


図-1 実験装置の概略図

(2) 実験条件

使用したモデル氷盤は図-1 に示されるように、鋼製で重量が 558.6N である。また前面部を 3 種類 ($\theta=0, 15, 30^\circ$) に傾斜させ、各々行い、このときモデル氷盤の重量が同一になるようウエイトで調整した。モデル氷盤の底部はフラットであるが、前述したように、実際の浮氷盤は喫水下に keel を持っているものが多い。しかし、その keel の形状はきわめて複雑であり、氷盤の大きさ、喫水深、sail 部との関係もまだよく解明されていないのが現状である。本実験においては、基本的な Scouring を把握するために、まずは底がフラットで実験

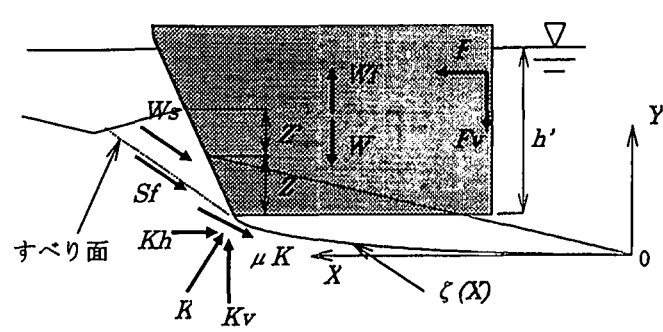
を行った。また使用した砂の特性を表-1 に示す。

表-1 用いた砂の特性

平均粒径	0.147mm
水中内部摩擦角 (ϕ)	37°
水中安息角 (β)	32°
水中単位堆積重量 (γ')	15.68kN/m^3

4. Ice Scour の単純モデル化

(1) Ice Scour の力学モデル



ここに、
 Z ; 砂の堆積高、 Z ; Scour depth、 W ; 氷盤の重量、 Wf ; 浮力、 K ; 地盤反力、 F ; 水平氷荷重 (抵抗力)
 Fv : 氷盤相互の鉛直摩擦力、 h' ; 氷盤の喫水深、
 μ ; 氷盤と砂との動摩擦係数、 ζ ; Scour curve、
 Sf ; せん断力 (せん断強さ)、 Wg ; すべり面を仮定したときの砂の自重

図-2 力学モデル図

図-2 に示したように氷盤が海底砂地盤に接触し、削っていく模様を実験と照らし合わせ、単純化したものである。このように氷盤には様々な外力、抵抗力が作用する。まず風や海流等の環境力で氷盤相互に発生するであろう水平方向氷荷重 (この実験では水平速度を一定に拘束しているため、加速度が発生せず、砂から受ける抵抗力そのものを示す)、浮力、底面部における地盤反力 (接地圧)、動摩擦力、また氷盤の前面部には連続的な砂のせん断破壊の発生、あるすべり面を仮定したときの砂の自重などが作用するものと考えられる。

今、氷盤はある平面的な曲線 $Y=\zeta(X)$ に沿って運動するものとする。ここではこの曲線を Scour curve と呼ぶことにする。Scour curve はある基準面からの斜面の高さから Scour depth を差し引いたものであり、いわゆる氷盤の平面運動軌跡である。この Scour curve は前述したようにビデオ解析により最小 2 乗法で 6 次曲線まで評価し、後に示すように計算に反映させた。この Scour depth が与えられれば、氷の水平方向、鉛直方向について

ての運動方程式によって氷荷重 F を近似的に算出される。この算出される F と実測値の F とを比較することで、間接的に、構築した力学モデルを検証し、Ice Scour のメカニズムを把握することにする。

(2) 氷盤前面に作用する抵抗力(R)

氷盤が Scouring されるにつれて、砂の連続的なせん断破壊が発生しているものと考えられる⁹⁾。ここでは砂の完全な塑性変形を考え、図-3 のようにある一様なすべり面を仮定し、その位置でのせん断強さ(S_f)、一体となってすべり面に沿う砂の自重(W_s)、その仮定の砂のクサビが側面に対して発生する摩擦力(S_s)、をもって抵抗力 (1式) とし、いずれもすべり面方向に作用すると仮定した。実際は砂の力学特性の変化、すべり面の変化によりその挙動はきわめて複雑であるが、一様、直線と仮定した。

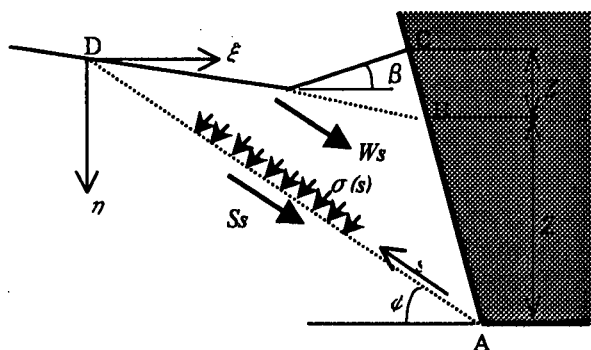


図-3 前面抵抗力のモデル図

$$Sf = B \int_0^L \sigma(s) \tan \phi ds$$

$$Ws = B\gamma' \int_0^4 \int_0^4 \sin \psi \eta d\eta ds$$

$$Ss = \gamma' Kp \iint_{A'} \eta \tan \phi d\eta d\xi$$

$$R = Sf + Ws + 2Ss \quad (1)$$

二二五

B ; 氷盤の幅、 σ ; すべり面上に発生する垂直応力、
 ϕ ; すべり面と水平面とのなす角 (ここでは $\pi/2 - \phi$ と仮定)、 Kp ; ランキンの受動土圧係数

A ; 積分領域 ABCD、B ; 積分領域 ABD

氷盤移動時における砂の堆積高 (Z)

①砂の圧縮・膨張がなく、ダイレタンスーが 0、②米盤によって押しのけられた砂の量はその前面部に堆積する量と側面部に流出する量との和に等しい、③砂の水中安息角はいたるところで一定、と仮定すれば図-2 のモデル

ル図より近似的に(2)式のように示される。

$$Z' = \frac{1}{N} \left[\exp \left\{ -\frac{\cot \beta}{N} X \right\} \times \int_0^X \exp \left\{ \frac{\cot \beta}{N} \right\} (X \tan i - \zeta(X)) dX \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここに、

$$N = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\cos(\theta - \beta) \cos(i + \theta)}{\sin(\beta + i) \cos^2 \theta} - \tan \theta (1 - \tan \theta \tan i) \right\}$$

(4) 水平方向の運動方程式

氷についての水平方向の運動方程式は(3)式で示される。本実験の場合、水平速度 V は一定に拘束されているので、(3)式左辺1項は0である。

$$-M \frac{d^2 X}{dt^2} - K v \left(\mu + \frac{d\zeta}{dX} \right) - R \cos \psi + F = 0 \quad (3)$$

ここに、 M は氷の質量。

(5) 鉛直方向の運動方程式

氷についての鉛直方向の運動方程式は(4)式で示される。

$$-M \frac{d^2 \zeta}{dt^2} + Kv \left(1 - \mu \frac{d\zeta}{dX} \right) - W + \left(h' B + \frac{1}{2} h'^2 \tan \theta \right) B \gamma_w \mp \mu k F - R \sin \psi = 0 \quad (4)$$

ここに、 γ_w は海水の単位体積重量、 h は水の喫水深であり、 h_0 を $X=0$ における初期喫水深とすれば次式で示される。

$$h' = h_0 - \zeta(X)$$

また、(4)式左辺5項の符号は $d\zeta/dX$ によって異なり、 $d\zeta/dX > 0$ のとき負、 $d\zeta/dX < 0$ のとき正となる。

5. 実験結果及び解析結果

図-4(a)～(c)に斜面勾配が 1/5、図-4(d)～(f)には斜面勾配が 1/10 の場合を示し、それぞれのグラフには氷盤前面の傾斜角 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ における水平氷中荷重における結果を比較した。ここでプロットは実測値、曲線は計算値を示す。また各々のグラフの下には対応する Scour curve を示した。

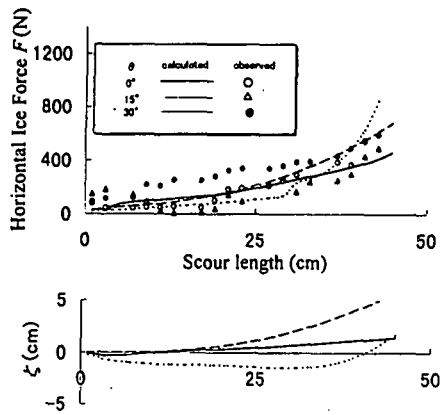


図-4(a) 実測値及び計算結果 ($i=1/5$, $V=0.4\text{cm/s}$)

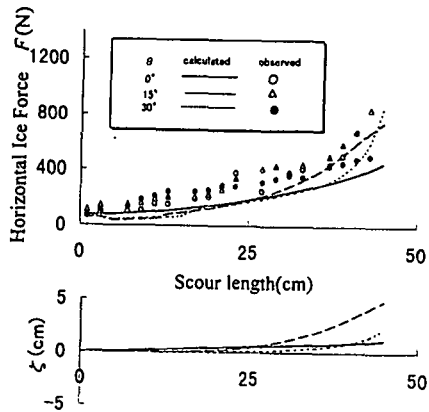


図-4(b) 実測値及び計算結果 ($i=1/5$, $V=0.9\text{cm/s}$)

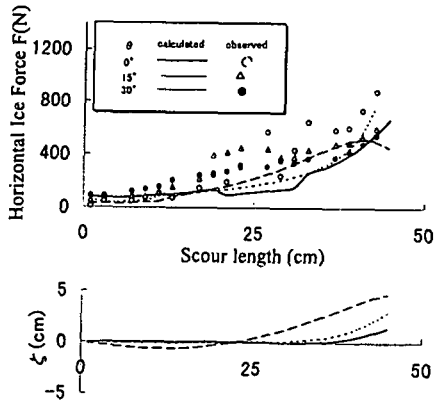


図-4(c) 実測値及び計算結果 ($i=1/5$, $V=1.4\text{cm/s}$)

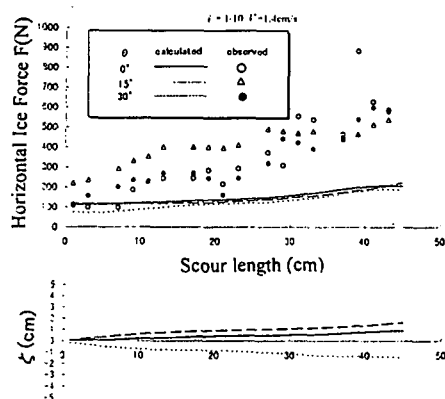


図-4(d) 実測値及び計算結果 ($i=1/10$, $V=0.4\text{cm/s}$)

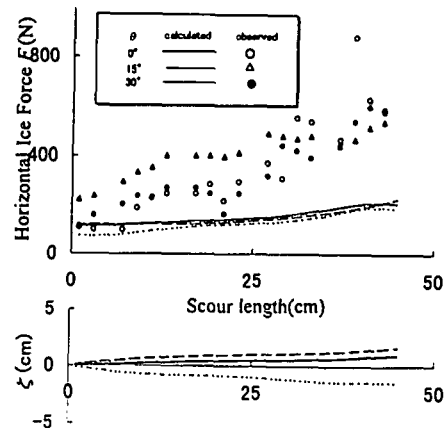


図-4(e) 実測値及び計算結果 ($i=1/10$, $V=0.9\text{cm/s}$)

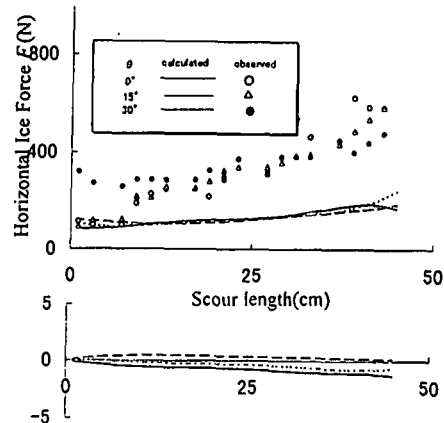


図-4(f) 実測値及び計算結果 ($i=1/10$, $V=1.4\text{cm/s}$)

(1) 氷盤前面傾斜角 θ による影響

氷盤前面傾斜角の変化による Scour curve はほぼ系統的な関係が確認され θ が大きくなるに従い、 $\zeta(x)$ も大きくなり、あまり削られない傾向にある。これは他の条件が一樣とすると θ が大きくなるにつれ、氷盤前面部と砂との境界面にすべりが生じやすく、また氷盤前面部の垂直方向の抵抗力により氷盤自体が不安定となり、若干の回転が生じ、相対的に鉛直上向きに変位するものと考えられる。にもかかわらず、水平氷荷重 F には系統的關係は見られなかった。

(2) 氷盤移動速度依存性について

移動速度依存性について見てみると、 F , $\zeta(x)$ ともに系統的な関係は見られず、この程度の速度の違い ($V=0.4\text{cm/s} \sim 1.4\text{cm/s}$) では速度の依存性は見出せない。本来速度が十分大きくかつ海底地盤がシルト質や粘土質であれば、過剰間隙水圧の発生、破壊時の土塊の慣性力などの考慮などに伴う動的な解析が必要とされるが、通常、氷盤の移動速度は Ice scour がよく確認されるカナダの東部沿岸で $0.1\text{m/s} \sim 0.5\text{m/s}$ 程度であり⁷⁾、静的、準静的として取り扱っても差し支えなく、この程度の速度変化はあまり反映しないものと考えられる。

(3) 計算値と実測値の比較

計算値と実測値の比較であるが、1/5 の場合、実測値の方が計算値よりも若干大きくなっている。これは実験装置の都合上、Scouring されるに従い、削られた砂が水面上に出て、砂の単位体積重量の増大やコンシステンシーの変化によるせん断強さの増加によるものと思われるが、これらの事を考慮すれば計算値と比較的よい一致を示していると言える。しかしながら 1/10 のときははるかに実測値のほうが大きく計算値とあまり一致してはいえない。これは上述したことに加え、計算上では $d\zeta/dX \geq 0$ の場合に、地盤反力は氷盤下部隅角部に集中的に作用すると仮定しており、この場合 $d\zeta/dX \leq 0$ が多く地盤反力（接地圧）の分布あるいは作用位置が不明であり、仮定と矛盾していることが原因であるためと思われる。

(4) Scour curve と F との関係

Scour curve と F との関係について述べる。実測値において F が多少、波をうって増減しているのは $\zeta(X)$ の形状に関係しているものと思われる。実際 $\zeta(X)$ の勾配が大きいと F が若干急に増加し、 $\zeta(X)$ の勾配が鈍くなったり、負になったりすると、若干落ち込むことが確認された。これは計算上でも再現することができ、ある質点系が曲線に沿って運動する場合の束縛力の変化によるものと思われる。一例として、実測値 $i=1/5$, $V=0.9\text{cm/s}$, $\theta=15^\circ$ の場合における $d\zeta/dX$ と d^2F/dX^2 との関係を図-5 に示す。なお、大まかに傾向を捉えるため、 $\zeta(X)$ と F は実測誤差を考慮し最小二乗曲線(6 次まで評価)とし算定した。測定誤差による Scour length に対する若干のズレはあるものの曲線形状はおおよそ同様の傾向を示し、 $d\zeta/dX > 0$ のとき $d^2F/dX^2 > 0$ であり、 F の局所的な増減が観察される。

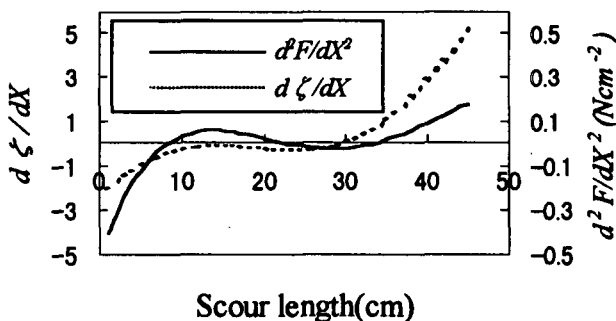


図-5 $d\zeta/dX$ と d^2F/dX^2 との関係

以上より、Scour curve は F の局所増減、Scour depth と密接な関係がある。T. R. Chari⁷⁾ は $\zeta=0$ 、K. Y. Yoon⁸⁾ は $\zeta=cX$ と仮定し、Scour depth の理論的な算定を試みて

いる。彼らは著者らと違い、一定の環境力で押し流されてきた単独氷盤が砂地盤に接触、減速停止した地点で Scour curve と基準高の差を Scour depth としている。確かに Scour curve は、linear であるという観測結果もあるが、先に述べたように様々な環境の変化での奇跡の部分消失、変形等で本来の形状を観測することは困難である。著者らの実験から氷盤の回転、すべり、事実上の砂の力学的不均一性等により、linear であるとは限らず、しかもその変化が微妙であっても F に影響を及ぼす。

(5) 鉛直方向氷荷重について

F と K_v との関係、すなわち水平方向および鉛直方向の氷荷重の関係について述べる。図-6 に式(3), (4)で算出される F/K_v の関係を示し、比較の実測値とよい一致を呈した 1/5 における典型的な例を示す。この図より F/K_v は数倍から 1 に近づく。

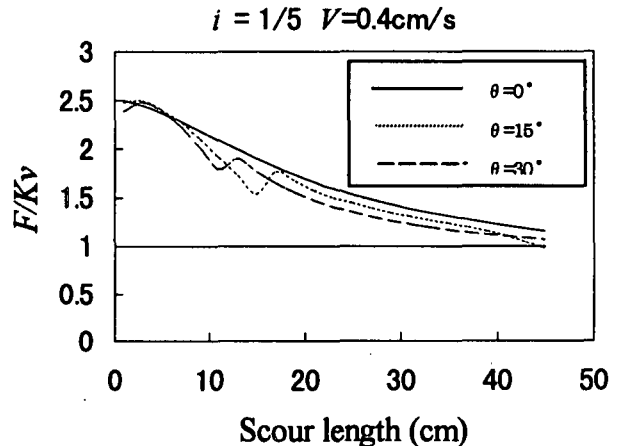
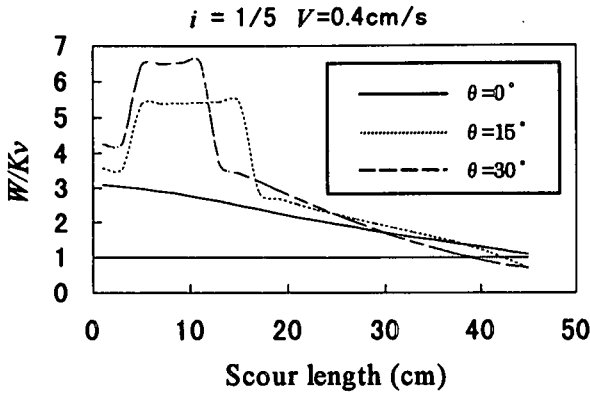


図-6 F/K_v の関係

これは F の増加率よりも K_v の増加率（浮力の減少、束縛力の増大が起因）の方が大きいことを示している。また鉛直氷荷重は水平氷荷重の数倍であるという Poulin⁹⁾ の実験 (1~1.5 倍) や Yang¹⁰⁾ の有限要素法によるシミュレーション結果 (およそ 3 倍) と同様の傾向を示している。

また図-7 に自重 W と K_v の比を示す。これも同様に数倍から 1 に近づく。

これも上述したように浮力の減少、束縛力の増加などで K_v が自重に近づいていることを示している。本実験の都合上ストローク 50cm までしか測定できなかったものでそれ以降の F_v/K_v , W/K_v の振る舞いは不明であるが W/K_v が通常 1 を超えないことを考慮すれば（氷盤の進入角度、後方条件により 1 を超えることも十分あり得る）、この実験範囲は妥当であり、 F は K_v を超えることが少ないと推定される。

図-7 W/Kv の関係

(6) Sub-Scour deformation について

これらの Ice Scour による荷重により、Sub-Scour deformation とよばれる地盤を介して伝播する応力、変形問題が近年指摘されている。従来は、埋設構造物の保護には、Scour depth を予測してそれ以下に埋設すればよいとされていた。Eyles and Clark¹¹⁾は Scarborough Bluffs で比較的保存状態のよい6万年前発生したと予想される Scour mark (Scour depth 2.5m)を調査し、Scour mark 以下 2m 地点で断層が発見された。これはその地点までせん断破壊が発生していたことを示している。また Woodworth-Lynas¹²⁾らは Lake Agassiz で Scour mark 以下 5.5m (Scour depth 2.5m)の断層を発見している。このように、予想 Scour depth 以下に埋設構造物を埋設し、ダイレクトに構造物に氷盤がヒットしなくても Sub-Scour deformation という二次的な被害要因であり得る事は否定できず、著者らの今後の課題でもある。

6. まとめ

- 1) Ice Scour の力学モデルを構築し実験によりこれを検証した。
- 2) $d\zeta/dX > 0$ のとき、概ね実測値と計算値が一致したが、 $d\zeta/dX < 0$ の場合には実測値のほうが大きく接地圧の考慮が必要である。
- 3) 氷盤前面傾斜角 θ によって Scour curve が異なり θ が大きくなるに従い削られない傾向にある。
- 4) 氷盤前面傾斜角 θ によって水平氷荷重 F に系統的な違いが見られない。
- 5) 水平氷荷重 F はこの程度の氷盤移動速度変化では依存性がない。
- 6) 水平方向氷荷重 F の局所的な増減は Scour curve のその位置での勾配 $d\zeta/dX$ に依存する。
- 7) 水平方向氷荷重 F は通常、氷盤の自重を超えることが少ないと推定される。

- 1) Palmer, A.C.: Alternative Path For Determination Of Minimum Burial Depth To Safeguard Pipeline Against Ice Gouging, Proceeding of Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.9-16, 1998.
- 2) Palmer, A.C., et al.: Ice Scour Mechanisms, Proceedings of the 10th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, Lulea, Sweden, Vol. I, pp.123-132, 1989.
- 3) Blasco, S.M.: Seabed Scouring by Sea-Ice: Scouring Process and Impact Rates: Canadian Beaufort Shelf, Proceeding of Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.53-58, 1998.
- 4) Machemehl, J.L. and Jo, C.H.: Ice Gouge Study in the Alaskan Beaufort Sea, Journal of Korean Committee for Ocean Resources and Engineering, Vol. III, No.2, pp.545-550, 1989.
- 5) Pilkington, G.R. and Marcellus, R.W.: Methods of Determining Pipeline Trench Depths in the Canadian Beaufort Sea, Proceedings of the 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, Quebec, Canada, Sweden, Vol. II, pp.674-687, 1981.
- 6) Chari, T.R.: Geotechnical aspects of iceberg scours on ocean floors, Canadian Geotechnical Journal Vol.16, no.2, pp.379-390, 1979.
- 7) Chari, T.R. and Muthukrishnaiah, K.: Iceberg threat to ocean structures, Proceedings, Symposium on Ice Problems, International Association for Hydraulic Research, Lulea, Sweden, pp.421-432, 1978.
- 8) Yoon, Y. et al.: A numerical Simulation to Determine Ice Scour and Pipeline Burial Depth, Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, USA, pp.212-219, 1997.
- 9) Paulin, M.J.: Physical model analysis of ice berg scour in dry and submerged sand. M.Eng. Thesis, Memorial University of Newfoundland, St. John's Newfoundland, 1992.
- 10) Yang, Q.S. et al.: Analysis of Subscour Deformation by Finite Element Method, Proceedings 4th Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering, St. John's, Newfoundland, Canada, pp.739-754.
- 11) Eyles, N. and Clark, B.M.: Storm-influenced deltas and ice scouring in a late Pleistocene glacial lake, Geological Society of America Bulletin, 100, pp.793-809, 1988.
- 12) Woodworth-Lynas, C.M.T.: Sub-Scour Deformation and the Development of Ideas from Field Work in the Last Decade, Proceeding of Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.33-38, 1998.

(1999. 4. 19. 受付)