

Ice Scour Eventにともなう地盤内の変形・発生応力に関する中規模野外実験

Medium-scale model experiments on soil deformation and stress within seabed during ice scour event

石川亮¹・木岡信治²・窪内篤³・佐伯浩⁴

Ryo Ishikawa, Shinji KIOKA, Atsushi KUBOUCHI and Hiroshi SAEKI

¹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 博(工) (独)北海道開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 (独)北海道開発土木研究所港湾研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴正会員 工博 北海道大学 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

Ice-Scour Event is a phenomenon that occurs when deformed ice such as an ice ridge comes into contact with seabed. Ice-Scour has been reported to cause damage to communication cables and water intake pipelines. As well as the estimation of the scour depth or burial depth of structures, it will be also important to consider a sub-scour deformation, which means stress transmission or soil deformation within the seabed below sea ice. In addition to our previous model tests related to the sub-scour deformation under the small scale condition (Kioka et al., 2004), we made a medium-scale model test. We confirmed that the stress within the seabed during ice-scouring did not depend on a drift speed of a model ice, and that the restriction due to attack angle was large. We also found that stress and reaction force greatly depend on relative density of soil. From the small-and medium scale model test results, we clarified the scale effects/similarities concerning reaction forces and stress distributions within the seabed.

Key Words : Ice Scour, Sub-Scour deformation, Ice Ridge, pipeline, stress

1. はじめに

Ice Scour Eventとはice ridgeなど喫水の大きな氷塊の移動による海底地盤の掘削現象であり、海底ケーブルや海底パイプライン等の海底構造物の被害が報告されている^{1), 2)}。著者等が意図する最終目的は海水による掘削深(scour depth)、ないしは、パイプラインなど海底構造物の合理的な埋設深度の推定手法である。著者等は従来から様々な条件下における小規模・中規模程度の模型実験を通じてIce Scour Eventにおける力学的相似や海底掘削プロセスを明らかにしてきた^{3), 4), 5), 6)}。また、氷と地盤との相互作用のモデル化と氷の運動方程式を含む力学的(計算)モデルを構築し³⁾、小規模・中規模実験によりその妥当性を示し、実規模へ適用できる根拠を得た^{4), 6)}。その力学モデルを現地(実規模)へ適用(変換)することを試み、幾つかのモデルケースを設定して感度分析を実施するとともに⁷⁾、ルーズなice blockで構成されている場合の変形氷(非固結層)が掘削状態にある場合、氷の底部破壊を考慮できる計算モデルを構築した⁸⁾。氷には高い拘束圧が

作用し、多くの場合、破壊が生じないことが推察され、実用的観点から、計算が容易となるよう、氷を剛体として取り扱えることのできる根拠を得た。

一方では、埋設構造物が直接氷と干渉しない場合でも、氷の移動にともなう生じる地盤内の土移動(Sub-scour deformation)⁹⁾が構造物に付加的な応力として作用する場合が想定されるが、この研究例は究めて少ない。

本研究では、過去に実施したSub-scour deformationに関する小規模模型実験結果⁹⁾を踏まえ、新たに野外中規模程度の実験を実施し、氷の移動による地盤内の変形・発生応力等の基本的特性をレビューするとともに、小規模模型実験を参考として、その力学的相似などについて考察した。

2. 中規模野外実験

中規模野外実験は、石狩湾新港西地区西ふ頭浚渫土砂処分地にて実施した。なお本実験は小規模模型実験と比べて牽引方法や地盤条件などがやや異なるが、模型氷の寸法や後述するScour cut depthが小

規模模型実験の4倍となるよう設計した。図-1に示すように幅120cm×高さ100cmの模型氷（鋼製）を、予め掘削深（scour cut depth；SCD）を与えた状態で、ワイヤ（φ12）を介して重機で水平方向に牽引することにより、水平地盤へ480cm程度貫入させた。なお、鉛直方向の模型氷の移動は拘束し、架台に取り付けられたガイドに沿って水平方向のみ移動する仕組みになっている。実験条件は表-1(a)に示すように、氷の移動速度（8.1～24.4cm/s）とScour cut depth（12cm，24cm），それに地盤の状態（相対密度）を幾つか変えて実施した。この場合、相対密度50%及び90%を目標とした2つの地盤状態を想定した。その実現値を表-1(b)に示す（ND；目標値50%，HD；目標値90%）。同じ地盤状態を想定している実験ケース（ND）では、その実験毎に極力同一の手順で砂を整理するとともに、常に氷に対して水平な地盤が確保できるようにメインフレーム側部に設置されたガイドに沿って砂表面を整えた。その直後（各実験前），砂置換法によって、実験領域で2～3地点のサンプルを採取し、後に、単位体積重量（あるいは相対密度）を推定した。表-1(b)に記載されているものは、その平均値である。なお、すべての実験において、attack angle（氷前面の傾斜角度）を45°としたが、この根拠は以下の事情による。前回の実験結果より⁹⁾、地盤内の応力あるいは変形挙動はattack angleに大きく依存するが、ある程度以上のangleをもてば大きな違いはないと考えられた。また、実海域での氷；ice ridgeのもつangleは20-45deg.である場合がほとんどであるので、実験条件として45deg.に固定し、実験条件を節約した。

計測項目として、まず模型氷の水平変位量は変位計（共和DTP-D-5KS 5m）により計測し、水平方向の反力は、模型氷とワイヤとの間に取り付けたロードセル（共和LUH-10TF；100kN）により計測した。また

模型氷を2層構造として、その間に設置された3点のロードセル（3分力計）（共和特注品、 $F_x, F_y=300\text{kN}$ 、 $F_z=100\text{kN}$ ）により鉛直方向の反力を計測した（図-1(b)参照）。さらに、図-1(c)に示すように、土中に埋め込まれた圧力センサ（共和BE-2KE, 200kPa, 有効受圧部面積：φ160, 1方向成分）によって地盤内の応力を計測した（基本的には横方向に配置、P2地点のみ上向センサを配置）。なお、圧力センサは模型氷の中心線上に3点配備し、P3地点において、横断方向（進行方向に直角方向）に4点、鉛直方向に4点、配備した。さらに、もう一つの計測項目として、地盤内に模型パイプライン（φ34mm, t2.8mm）を模型氷の進行方向（900cm），横断方向（800cm）にそれぞれ

表-1(a) 実験条件

	移動速度(cm/s)		SCD (cm)	地盤	移動距離 (cm)
	目標値	実現値			
Case-1	15	10.3	24	ND	457.7
Case-2	15	8.1	24	ND	473.2
Case-3	25	15.9	24	ND	476.7
Case-4	50	24.4	24	ND	480.0
Case-5	15	9.6	24	ND	485.7
Case-6	15	13.2	12	ND	486.2
Case-7	15	8.1	24	HD	468.2
Case-8	15	9.7	24	ND	485.4

表-1(b) 現地砂の特性

中央粒径(mm)	0.311
均等係数	2.718
内部摩擦角(°)	34.1
安息角(°)	31.5
砂粒子比重	2.679
含水比(%)	9.5～11.5(10.56)
砂の状態	ND HD
単位体積重量(kN/m ³)	13.5 15.3
相対密度(%)	44.7 85.3

注記）砂の状態ND,HDはそれぞれ、通常の状態、意図的に締め固めた状態

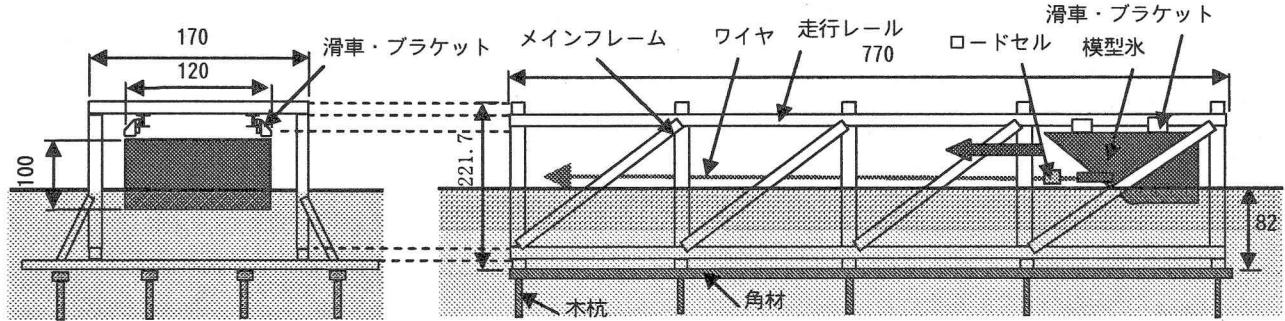


図-1(a) 実験概要図

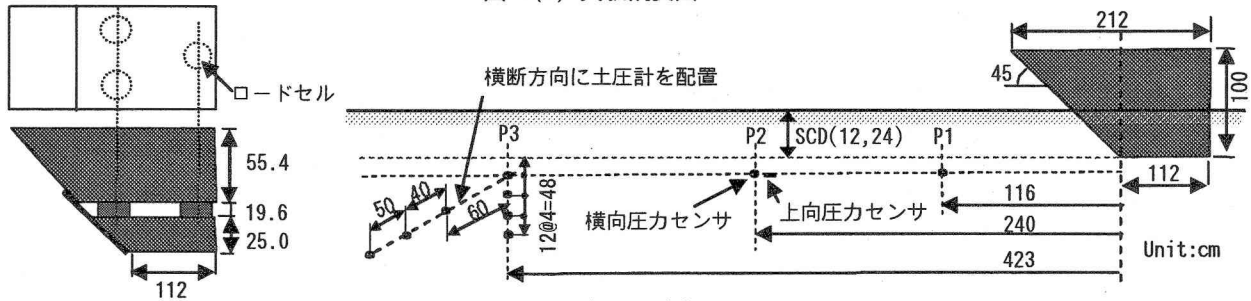


図-1(b) 模型氷の構造

図-1(c) 圧力センサの配置図

1本配置した。各パイプラインには3箇所（1箇所につき、周方向に縦横2×4点）計24点のひずみゲージを貼り、パイプラインの挙動特性を調べた。なお、この結果については、紙面数の都合上、ここでは割愛し、次回に報告したい。

3. 実験結果及び考察

(1) 氷の移動にともなう地盤内応力（水平方向）

(a) 地盤内応力の一般的な振る舞い

図-2(a)に、Case-2を例として、模型氷の中心線上に3点配備した各圧力センサの氷の移動距離（Scour length）に伴う応答例を示す。図中のP1,P2,P3は、氷の進行方向の順に配備した圧力センサの名称（位置）を表している。また、図-1(c)に示すように、氷のスタート地点を0としたとき、各センサ位置は116,240,423cmの位置に配備している。図より、いずれの場合もセンサの示す値（以下、応力とよぶ）はピークを示し、そのピーク値を示す模型氷の位置は、模型氷の隅角部が圧力センサの直上を通過する手前であり、小規模模型実験結果と同様な傾向にあった。また模型氷の隅角部が圧力センサの直上を通過する頃には、応力がある値まで減少（除荷）し、それ以降、ほぼその値で一定に推移しており、残留変形が生じていることが推察される。また、後述するように、Scour lengthに応じて応力は増大傾向にあるのが分かる。これは、掘削された砂の氷前面近傍への堆積量の増大と、angle効果⁹⁾（氷前面部がattack angleをもつ場合、その堆積土を含む氷前面部近傍の土塊を拘束・圧縮することによって地盤内部に土移動が伝達される）によるものと思われる。この場合、応力が上昇し始める模型氷の位置と各圧力センサとの相対距離が、Scour lengthにともなって増大していることも見て取れる。

次に図-2 (b)には、同じ Case-2 を例として、P3 地点に鉛直方向に配置した各圧力センサの応答例を示す。地盤表面からの深さとともに応力は減少するが、この場合、60cm 地点では負値となる領域が存在し、この付近では逆に膨張が生じていることが推察される。これは、氷移動に伴う地盤内の過剰間隙水圧を測定した実験より、負圧が発生することから、膨張領域が確認された事⁵⁾からも推察される。また、

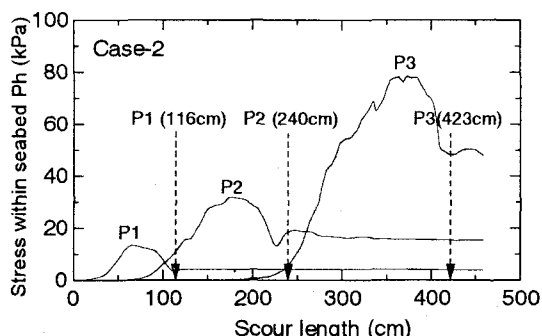


図-2(a) 氷の移動距離(Scour length)に伴う各圧力センサー (P1,P2,P3) の応答例 (Case-2)

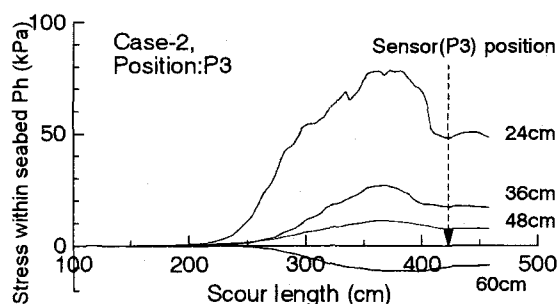


図-2(b) 埋設深度が異なる各圧力センサの応答例 (Case-2)

各圧力センサがピーク値を示す模型氷の位置がほぼ同一であることも見て取れる。

(b) 地盤内応力の氷の移動速度への依存性

図-3 には、応力の代表値として圧力センサが示すピーク値(Ph_{max})と氷の移動速度との関係例を示す。応力は模型氷の移動速度に対する明確な依存性は見られず、小規模模型実験と同様な結果となった。

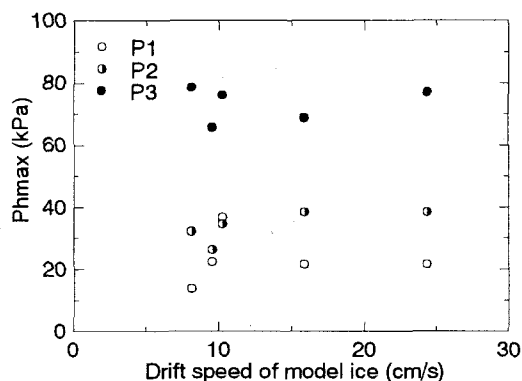


図-3 地盤内応力（最大値）と氷の移動速度との関係

(c) 地盤内応力（最大値）の空間分布（縦断方向・深さ方向・横断方向）と力学的相似性の検討

図-4 に、地盤内応力の最大値の縦断方向の分布、つまり、氷の進行方向の順に配備した各圧力センサ(P1,P2,P3)が示す最大応力の比較を示す。この場合、前項より、応力の速度依存性は見られないことから Case-1,2,3,4,5,8(SCD=24cm,ND)についてはその平均値をとった。縦軸には応力を地盤の単位体積重量(γ)とスケールの代表値（ここでは模型氷の幅 B ）で除した無次元量、横軸はセンサまでの水平距離(L)をそのスケールの代表値で除した無次元量を採用した。前述のように Scour length に応じて応力は増大傾向にあるのが分かる。また同図には Case-7、つまり相対密度が高い(HD,85.3%)場合の応力も図示したが、前者(ND,44.7%)に比べ約2倍程度大きくなっており、相対密度にも大きく依存することが推察される。また、同図には、参考に、スケールが1/4で、同じ attack angle (45deg)の場合の小規模模型実験結果(SCD=6cm)⁹⁾を示した。なお中規模実験は、前述したように、牽引方法や地盤条件

(相対密度は ND とほぼ同じであるが含水比はやや異なる；小規模では乾燥砂，中規模では含水比 10%程度)などがやや異なり，全く同一条件ではないが，参考程度に比較している．後に示すように中規模と小規模実験との「力」の比は，概ね相似比 $N(4:1)$ の 3 乗となっており，破壊領域（氷前面部近傍の楔領域）を除く地盤内部を弾性体と仮定し，また面積比 N^2 を考慮すると，圧力の比は N となることが期待される．前述の実験条件等の相違により単純には比較できないが，図より，応力を地盤の単位体積重量 (ρg) とスケールの代表値（ここでは模型氷の幅 B ）で除した無次元量で表すと，小規模模型実験の無次元応力は，中規模実験結果（ND；Case-1,2,3,4,5,8）のそれにおおよそ等しいと見ることができ，圧力の比は相似比であることが仮定できる．しかしながら，中規模実験結果では Scour length に応じて応力は増大傾向にあるが，小規模では顕著な増加は見られない．これは後にも示すように，小規模実験の反力が水平距離 L/B (SCD=6cm の場合) が 3~3.5 程度までは単調に増加するが，それ以降ではある値を付近に増減を繰り返す傾向にある．これは掘削砂の氷前面への堆積量が飽和状態（側部への流出量増大）に達することに加え，地盤内の膨張収縮を含む複雑な地盤破壊メカニズムによるものと思われる．なお，この詳細なメカニズムについては報告済みである⁹⁾．一方，中規模実験では，コストを含む現場での種々の制約上の理由より，ちょうどこの付近の距離までしか実施しておらず，それ以降の挙動については未知であるが，同様な傾向が期待される．したがって P3 地点付近の応力分布が最大に近い値を示すものと考えることができる．

次に図-5 にはその P3 地点の地盤内応力（最大値）の地盤深さに伴う変化（鉛直方向分布）を示した．また，先と同様に，参考として小規模模型実験結果 (SCD=3cm, 6cm) も図示している．なお，縦軸は，地盤表面からの深さ (Z)（各センサの埋設深度）を SCD で除した無次元量を表す．図中には SCD の異なるものや，小規模模型実験結果が示されているが，このように整理すれば，概ね一つの曲線上にバラつき，実用的には，相対密度毎にスケール効果を考慮した共通の鉛直方向の最大応力分布を仮定できる可能性がある．図より応力は深さとともに指数的に減少し，この場合，SCD の 3 倍の深さではほとんど応力は作用しないことが見て取れる．また地盤の相対密度が高い Case-7 での鉛直分布も，先の縦断方向の分布と同様，2 倍程度大きな値となっている．

図-6 には P3 地点の地盤内応力（最大値）の横断方向（氷の移動方向に直角方向）の分布を示した．この場合，模型氷の中心位置における応力が最大で，中心から離れるにつれて減少し，中心より模型氷の幅分（氷の $1/2$ の幅 $B \times 2$ 倍）の地点では応力はほぼ 0 となっている．また，先と同様，地盤の相対密度が高い Case-7 での横断分布も，2 倍程度大きな値となっている．なお，小規模実験ではこの横断方向

の応力は計測していないので比較は行っていない．

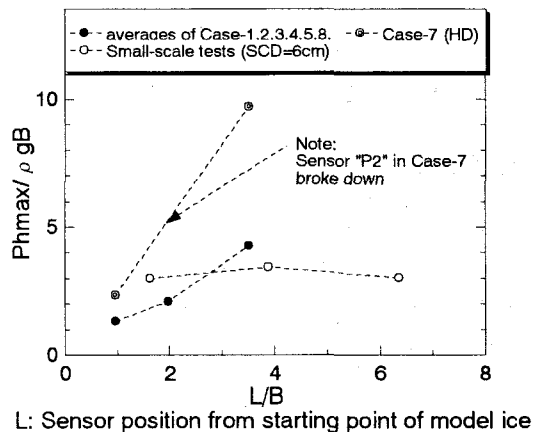


図-4 氷の進行方向の順に配備した各圧力センサが示す最大応力の比較

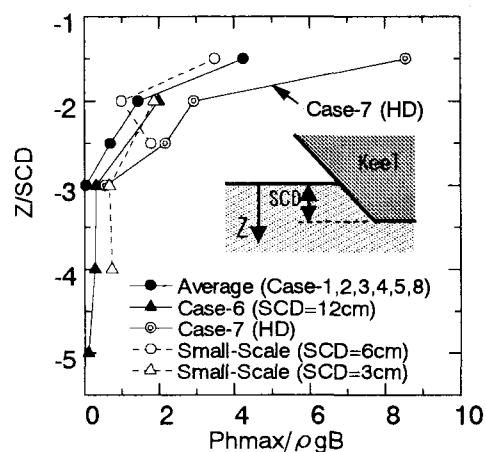


図-5 地盤内応力のP3地点の鉛直方向分布（代表値として圧力センサの示すピーク値(Phmax)を採用）

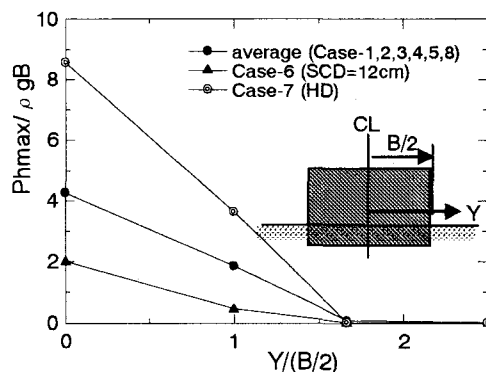


図-6 地盤内応力の横断方向分布（代表値として圧力センサの示すピーク値(Phmax)を採用）

(2) 地盤掘削中の模型氷に作用する反力の検討 (a) 氷の移動に伴う反力の推移

図-7 には，模型氷とワイヤとの間に取り付けたロードセルにより計測した地盤掘削深中の模型氷に作用する水平方向の反力の例を示している．なお，縦軸には地盤の単位体積重量とスケールの代表値（先と同様，模型氷の幅 B ）の 3 乗で除した無次元量を表し，参考に小規模模型実験の反力も図示して

いる。後述するように、図より、中規模と小規模実験の力の比はおおよそ相似比の3乗となっていることが分かる。また、前述した理由により、小規模模型実験(SCD=6cm)では L/B が3~3.5以降では(この例では3程度)、ある値を基準に増減を繰り返している⁹⁾。一方、中規模実験では $L/B=4$ 程度までしか実施していないため、それ以降の反力の推移は分からないが、ちょうどこの付近(L/B が3~3.5)で一定値あるいは増減するような兆候があると見ることができる。一方、SCDが小さなCase-6(SCD=12cm)および小規模模型実験結果(SCD=3cm)では、掘削深が小さい分、掘削砂の氷前面への堆積量が比較的小さく、 $L/B=3\sim 3.5$ 程度ではまだ飽和状態に達しないため(砂を保持するキャパシティーがある)、比較的緩やかに増大しつづけていることが見て取れる。

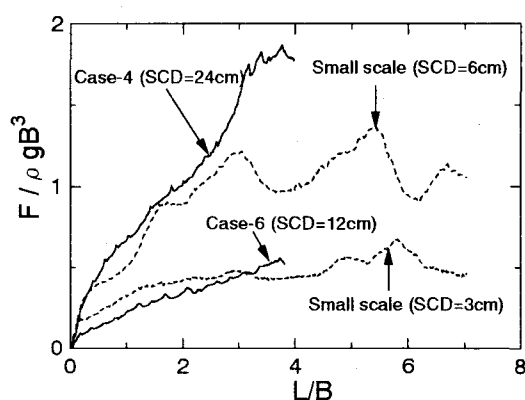


図-7 氷の移動に伴う水平方向反力の推移の例

(b) 反力の力学的相似性の検討

前項に述べたように、力の比は概ね相似比の3乗で表されることを示したが、この根拠を、相似則の緩和により、立証してみる。まず主な支配的物理法則は、①慣性力、②重力、③粘着力、④内部摩擦力、⑤外力、であると考えられる。なお、地盤と氷表面での接着力は、氷表面に薄い砂の層が接着して相対的に運動しないとして無視している。また、地盤は原型に近いものを用いれば、内部摩擦係数($=\tan \phi$; 地盤の内部摩擦角)は等しい。ただし、その場合には粒子径は相似にはならないが粒子運動の集積効果を問題としていることから無視しても差し支えないと考えられる。さらに、小規模模型実験結果と同様、中規模模型実験でも反力の模型氷の速度依存性は確認されなかったことから、この移動速度の範囲では、慣性力の寄与は小さい(変形速度が遅い)と考えることができる。また、本実験で用いた地盤は砂質土であり、粘着力は無視でき、結局、②自重と⑤外力との比 F_l / gL^3 が(L :寸法の代表値)、パイナンバーとなる。つまり、力の比は相似比の3乗となることが示される。また、変形速度が遅い粘性土の場合には、力の比は相似比の2乗となる。ブルドーザーや耕作機などの性能試験を意図した相似模型実験が、幾つかのスケールで実施されており¹⁰⁾¹¹⁾、その結果も上記のことを示している。

ここで、改めてこの事について確認するため、図-8に、小規模模型実験結果⁹⁾を含む水平反力と鉛直反力の散布図を示す。なお、力の代表値として、計測範囲内における反力の最大値を採用した。また、力は地盤の単位体積重量とスケールの代表値(模型氷の幅 B)の3乗で除した無次元量とした。なお、小規模と中規模では計測距離(移動距離)が異なるが、前述の理由により、両者の最大値は、同程度になると暗に仮定している。まず、小規模模型実験と同様、水平反力は鉛直方向のそれと比べやや大きい傾向にあるが、比例関係がみられ、attack angleによる拘束効果が大きいことが確かめられた。また、この図より、両反力の氷の移動速度による依存性は確認されないことが分かる。また、相対密度が大きなCase-7(HD)の反力の大きさは、NDと比較して、前述の応力とは異なり、1.5倍程度となっている。これは、前項で説明した $B/L=3\sim 3.5$ (相対密度40~50%の場合)よりもやや早い段階($B/L=3$ 程度)で、一定値に達しているためである。

次に、水平方向の反力の力学的相似性について、Case-1の無次元反力がやや小さめの感があるが、その他は概ね小規模模型実験結果に近い値となっており、力の比は相似比の3乗で表されることが期待される。一方、鉛直方向の反力については、小規模に比べて中規模実験の方が小さな値となっているが、これは、正確な鉛直方向の力の計測は難しい事に加え、両実験の計測方法の違いに起因するものと思われる。小規模実験の際には、ロードセルが模型氷の上面に配置されており、鉛直方向に作用する反力すべてを受ける仕組みになっている。一方、中規模実験では図-1(b)に示すよう、別の目的で模型氷を2層構造としており、その間にロードセル(3分力計)を配備しているので、特に掘削砂の氷前面部へ堆積高が模型氷の上部構造まで達したとき、すべての反力を伝達できず、やや反力を過少評価している。

以上の事情を踏まえれば、実用的観点より、力の比は、相似比の3乗で表されると仮定できるものと思われる。

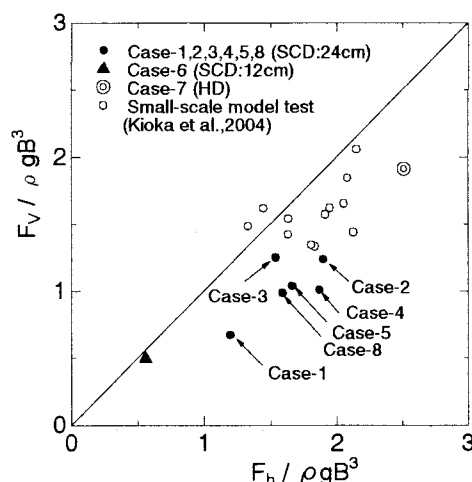


図-8 水平反力と鉛直反力との関係および小規模模型実験結果⁹⁾との比較(代表値として最大値を採用)

4. 氷海域におけるパイプラインの敷設例と本研究における今後の課題

氷海域におけるパイプライン敷設の実績例は多くはないが、アラスカ・クック湾におけるパイプライン（総延長約 14km）、ボーフォート海における Northstar Pipeline（約 10km）、及び Panarctic F-76 Drake wellhead~Cape Sabine（メルビル島）約 1.3km、サハリン北東部における 2km のモリクバックパイプライン（Sakhalin II, Phase 1）等がある。特に Northstar パイプラインの敷設には ice scour の影響が考慮され、主として海底調査結果をもとに、海底面下 2m~3m に埋設されているが、Sub-scour deformation の影響は考慮されていない。またサハリン北東部で進行中のサハリン II プロジェクトの Phase 2 では、Lunskoye Field における 2 つの海底パイプライン（LUN-A プラットフォームから陸へ 14.2km）、及び Piltun-Astokhskeye (PA) Field における 4 つの海底パイプライン（2 つの沖合プラットフォーム PA-A, PA-B より陸へ、それぞれ原油・天然ガス用の各 2 本ずつ、長さ 17.5km 及び 42km、外径 36cm）の建設が進められている（LUN-A フィールドでの敷設は 2004 年夏着工）^{12) 13)}。両フィールドのパイプラインは、ice scour による影響も考慮されており、ある水深（PA では 25m、LUN-A では 27m）以下では、海底以下 2m まで埋設され、砂や砂利などで埋め戻される。しかし、PA Field では、コクジラの生態系に配慮し、予定のパイプラインルートに南に変更する事が提案されているほか、2003 年に実施された海底調査結果から、以前の調査結果より深い Scour depth が確認されており、より深い埋設深度が必要であると報告されており、2004 年の夏に予定されていた敷設開始が延期されている¹³⁾。これらのフィールドにおけるパイプラインの埋設深度は主に、サイドスキャンソナーやマルチビーム測深機等を用いた海底調査結果から推定されており、sub-scour deformation の影響は考慮されていない。

Ice scour event は、従来から理論的・実験的アプローチによる研究がなされているが、非常に複雑な現象であるため、未だ十分実用性に耐え得る段階に至っておらず、コストと信頼性に課題がある海底調査に依存しているのが現状である。このため sub-scour deformation を含む ice scour を考慮した統一的で合理的なパイプラインの埋設深度の推定手法が未だ確立されていない。今後、Newfoundland 沖の 600km を越す Grand Banks パイプラインの他、バレンツ海、ノルウェー海、ボーフォート海などにおけるパイプライン構想があり、今後さらに氷海域におけるパイプラインが増大するものと思われる。このため現存するパイプラインをレビューする目的も含め、海底実測調査を補うことができる理論的・実験的アプローチによる掘削深推定手法及び sub-scour deformation も考慮した合理的な埋設深度推定手法を精力的かつ早急に確立する必要がある。

本研究では、その要素研究のひとつ sub-scour

deformation に関する実験を実施した。地盤内応力は地盤の相対密度に大きく依存し、実用的観点から相対密度毎にスケール効果を考慮した最大地盤内応力分布を基準化できる可能性があることを述べた。今後は様々な相対密度のもと、さらに多くの実験を実施する予定である。本研究の最終目的は sub-scour deformation による地盤内のパイプラインの挙動であり、本実験でもその実験を実施したが、次回の機会に述べる。この種の実験に加え、前述の基準化された地盤内応力分布を入力条件としたパイプラインの応答解析モデルを開発し、理論と実験の両面から、この問題を解決していきたい。さらに、これを、著者らが海底調査の不確定性を補完する目的で開発中の氷の掘削深推定手法と組み合わせ、合理的なパイプラインの埋設深度推定の支援ツールを完成させたい。

参考文献

- 1) Duval, B.C.: Exploratory drilling on the Canadian continental shelf, Labrador Sea, *Offshore Technology Conference*, Paper No.2155, pp.59-67, 1975.
- 2) Grass, J.D.: Ice Scour and ice ridging studies in lake Erie, *Proc International Symp.on Ice*, Vol.2, pp.33-43, 1984.
- 3) Kioka, S., Yasunaga, Y., Watanabe, Y. and Saeki, H.: Evaluation of Ice Forces Acting on Sea bed Due to Ice Scouring, *Proc 10th International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, Vol.1, pp.749-755, 2000.
- 4) 木岡信治, 安永喜勝, 松尾優子, 河合邦弘, 佐藤正樹, 佐伯浩: Ice Scour Event に関する中規模野外実験, 海洋開発論文集, Vol.17, pp.613-618, 2001.
- 5) 木岡信治, 安永喜勝, 松尾優子, 佐伯浩: 様々な条件下における Ice Scour Event に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol.17, pp.607-612, 2001.
- 6) 木岡信治, 安永喜勝, 松尾優子, 佐伯浩: Ice Scour Event の地盤掘削プロセスと実験条件の制御, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.749-754, 2002.
- 7) 木岡信治, 窪内篤, 佐伯浩: Ice Scour Event (氷による地盤掘削現象) に関する計算モデルの現地への適用性に関する一考察, 海洋開発論文集, Vol.19, pp.797-802, 2003.
- 8) Kioka, S., Ishikawa, R., Yamamoto, Y. and Saeki, H.: A Consideration on Fracture of Ice Ridge Keel During Ice Scouring, *Proc 19th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea ice*, pp.207-214, 2004.
- 9) 木岡信治, 石川亮, 窪内篤, 佐伯浩: Ice Scour Event にともなう地盤内の変形・発生応力に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, Vol.20, pp.1241-1246, 2004.
- 10) Schuring, D.J. and Emori, R.I.: Soil deforming processes and dimensional analysis, *SEA Trans*, Vol.73, pp.485-494, 1965.
- 11) Harrison, W.L.: Analytical prediction of performance for full size and small scale model vehicles, *Proc. 1st International Conf. on Mechanics of Soil-Vehicle Systems*, pp.678-702, 1962.
- 12) Sakhalin Energy Company Ltd.: Environmental Impact Assessment, Vol.2, downloaded from http://www.sakhalinenergy.com/environment/env_archive.asp
- 13) Sakhalin Energy Company Ltd.: Comparative Environmental Analysis of the Piltun-Astokh Field Pipeline Route Options, Chapter 2, http://www.sakhalinenergy.com/environment/env_whales_cea.asp