

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

Experimental study on soil deformation and stress within seabed during ice scour event

木岡信治¹・石川亮²・窪内篤³・佐伯浩⁴

Shinji KIOKA, Ryo Ishikawa, Atsushi KUBOUCHI and Hiroshi SAEKI

¹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)

²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)

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 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8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. Although most of technical issues against the ice-scour have been focused on estimating the scour depth/burial depth, it will be also important to consider a sub-scour deformation, which means stress transmission or soil deformation within the seabed below the sea ice.

In this study, we carried out basic model experiments related to the sub-scour deformation by setting up some test conditions. We found that the stress within the seabed during ice-scouring does not depend on a drift speed of a model ice but an attack angle, and that the model ice with the smaller attack angle is thought to cause the soil deformation of larger areas because of restriction/compression of a large amount of soil in front of inclined surface of an ice.

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氷による掘削深(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)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、次節でも説明するよう、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)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、この研究例は極めて少ない。

本研究では、“Sub-scour deformation”に着目し、まずは幾つかのモデルケースを設定した基本的なモデル実験を実施し、氷の移動にともなう地盤内の変形・発生応力などの基本的特性について考察した。

2. Sub-Scour deformation

埋設構造物が直接氷と干渉しない場合でも、海氷の移動により、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。Eyles and Clark⁹⁾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地点で断層を発見し、その地点までせん断破壊が発生していたことを指摘している。

また Lake Agassiz で Scour mark 以下 5.5m (Scour depth 2.5m) の断層を発見している¹⁰⁾。このように、推定される Sour depth 以下に埋設構造物を埋設し、ダイレクトに構造物に氷が干渉しなくても Sub-Scour deformation という間接的なダメージの存在の可能性を否定できない。一方では、「パイプラインの変形はもたらされるが、降伏応力を超えるものではなく、破損は生じない」という楽観的とも受け止められる検討結果等もある¹¹⁾。

3. 実験方法

本実験では、基本的に、従来の実験装置³⁾⁵⁾⁶⁾と同じものを用いた。図-1に示すよう、幅60cmを有する水路に、市販の乾燥圭砂を一樣勾配に敷き詰めて、模型氷を走行台車で模型地盤に貫入させた（水は入れない）。ここで、用いた砂の特性を表-1に示す（従来の研究で用いた数種類の砂のうちの一つで、S. T. 1に相当する⁶⁾）。従来の実験とは異なり、予め模型氷の地盤への掘削深 (scour cut depth) を与え、鉛直上向きの変位を拘束した。そこで、模型氷側に設置されたロードセルにより貫入中の模型氷の鉛直方向、水平方向の反力を計測するとともに、土中に埋めこまれた圧力センサー（共和BE-2KE, 有効受圧部面積：φ160、1方向成分）によって地盤内の応力（水平・鉛直方向）を計測した。圧力センサーは scour cut depth より 30mm の地点に埋設し、模型氷の進行方向に 700mm 間隔に 3 点設置した（進行方向より R, M, L と名付ける）。ただし中央 (M) には鉛直方向にも 30mm 間隔で 3 点配置した（鉛直下向きに MU, MM, MD と名付ける、図-1下参照）。砂層厚は 300mm である。

実験条件として、attack angle（水平方向から計った氷前面部の傾斜角度）を 30, 45, 90deg の 3 種類、模型氷の貫入速度は 1～30cm/s、Scour Cut Depth は 3cm, 6cm の 2 ケースで行った。実験はバラツキを考慮し、同一条件で 3 回ずつ繰り返し実施した。

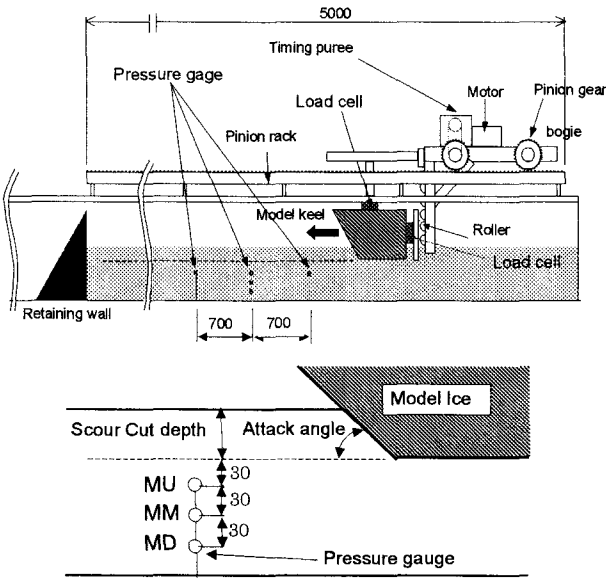


図-1 模型実験装置の概略図

表-1 用いた砂質土（市販圭砂）

中央粒径 (mm)	0.167
均等係数	2.19
内部摩擦角 (間隙比 0.7)	33.1
安息角	33.0
砂粒子比重	2.66
水中単位単位重量 (kN/m ³) (間隙比 0.7)	9.57
模型氷と砂との動摩擦係数	0.32

後の実験結果では基本的にその平均値を用いている。従来の実験方法と異なる点は、海底の勾配を付けず、一樣勾配としたこと、飽和砂でなく乾燥砂を用いたこと（水を入れない）、それに予め模型氷の地盤への掘削深 (scour cut depth) を与え、鉛直上向きの変位を拘束した、ことである。上記は、従来の実験結果から、極めて複雑な掘削過程を実現させる要因となることが確認されている。このような単純化により、本実験で最も着目すべき「氷の移動による基本的な地盤内応力・変形」をより明確に抽出でき、また、得られる実験結果は、将来的に地盤内挙動のシミュレーションモデルを構築した際、その検証用データとしての活用を意図したからである。

4. 実験結果及び考察

(1) 氷の移動による地盤内応力の影響範囲

図-2に、圧力センサー位置を原点とする模型氷の隅角部からの相対距離に対する圧力センサーの応答例を示す。いずれの場合も応力値は鋭いピークを示し、その位置は圧力センサーの手前で生じた。図-3(a)には地盤内の圧力センサーのピーク値を示す模型氷の位置（隅角部）と圧力センサーとの相対距離と attack angle、及び移動速度との関係例を示す。前述のように、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ーの直上を通過する手前であり、そのときの模型氷の隅角部と圧力センサーとの水平相対距離は数十cmで scour cut depth の数倍に及んでいる。またその距離は、attack angle が小さくなる、つまり傾斜が大きくなると増大した。また移動速度が大きくなると、その距離はやや減少傾向にあった。また、図-3(b)にはセンサーが上昇し始める模型氷の位置と圧力センサーとの相対距離を一例として示した。Angle が小さくなると、その相対距離は大きくなる傾向にあり、その影響範囲は大きくなると考えられる。またばらつきは見られたものの、概ねセンサー位置や向きによらず、scour cut depth が 3cm, 6cm の時は、それぞれ 50～80cm, 80～120cm の範囲にあり、この場合、scour cut depth の 15-25 倍前後となっている（厳密な scour cut depth との相関は明確でない）。なお、この場合、明確な速度依存性は確認されなかった。

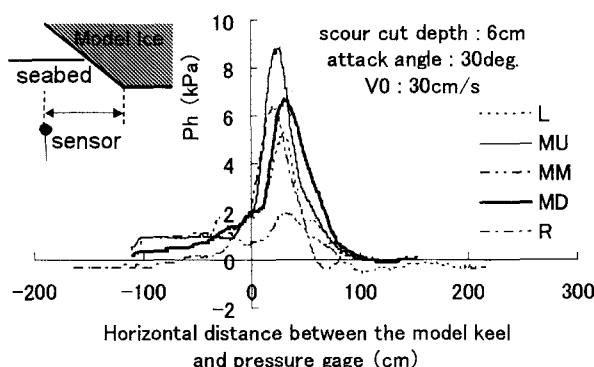


図-2 模型氷通過時の地盤内圧力センサーの応答例

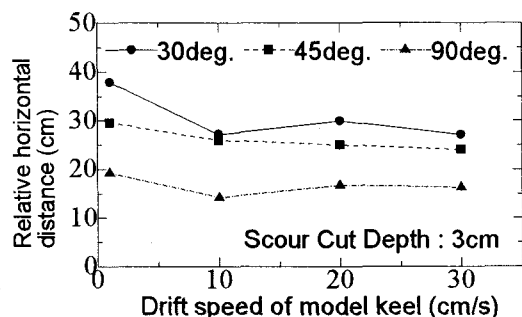


図-3(a) 地盤内の圧力センサーのピーク値を示す模型氷の位置と圧力センサーとの相対距離 (一例)
(Scour cut depth: 6cm, センサー: MU)

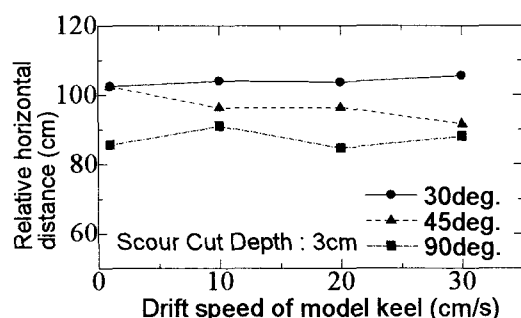


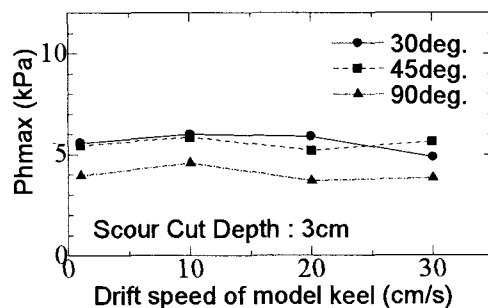
図-3(b) センサーが上昇し始める模型氷の位置と圧力センサーとの相対距離 (一例)
(Scour cut depth: 6cm, センサー: MU)

(2) 氷の移動速度と angle の地盤内応力への影響

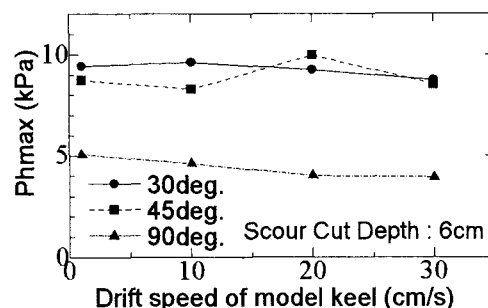
図-4(a)(b)に、Scour cut depthがそれぞれ3cm, 6cmの場合の地盤内の水平方向の応力と模型氷の移動速度およびattack angleとの関係例を示す(センサー: MU)。ここに地盤内の応力とは、代表値として前項に示した圧力センサーの示すピーク値を採用している(Ph_{max})。図より、水平方向の応力は模型氷の移動速度に対する明確な依存性は見られない。一方、attack angleの効果については90deg.より30deg., 45deg.の場合では明らかに応力が大きくなるが、30deg.と45deg.の場合では前者の方がやや大きい傾向がある程度で(30deg. > 45deg. >> 90deg.), attack angleがある程度以上大きくなれば、地盤内の応力に大きな相違がないことが推察される。この原因は後述するように、attack angleによる拘束効果に起因する。また、鉛直方向の応力に

についても同様に調べたが、この場合は、やや移動速度に依存し、移動速度の増大とともに、応力は低下傾向を示した。前項の「ピーク値を示す模型氷の相対位置」の移動速度にともなう低下(図-3a)も合わせて考えると、これは、移動速度による氷前面部の堆積砂と破壊楔の状態変化に起因するものと思われるが、特に、掘削中の地盤は膨張収縮の繰り返しであり、移動速度が速いと十分圧縮される間もなく次のステップへ移行する、あるいはこれらに起因する地盤内の破壊すべり面の変化も一つの原因であると考えられる。ただし、特に鉛直方向の応力にのみやや速度依存性が見られるのかは不明であり、今後詳細に追求したい。一方、attack angleの効果については、水平方向の応力と同様な傾向であった。

またscour cut depthの違いが応力の値に及ぼす影響について考えると、同図(a)(b)からも理解できるよう、scour cut depthが大きくなれば、30deg.と45deg.の場合地盤内の応力は増大するが、90deg.の場合には大きな違いは見られなかった。これは、後述のattack angleによる拘束効果に起因するものと思われる。また、水平方向と鉛直方向の応力値の大きさを比較すると、移動速度など条件により異なるが、概して大きな違いがあるというわけではなかった。



(a) Scour cut depth: 3cm

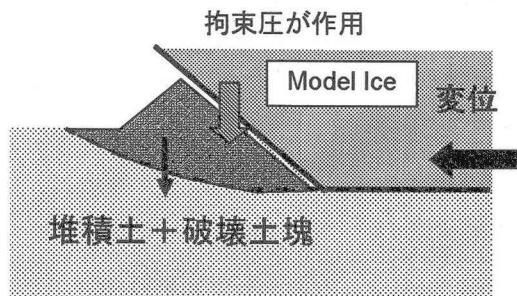


(b) Scour cut depth: 6cm

図-4 地盤内の応力とattack angle及び移動速度との関係例(センサー: MU水平方向)

次にattack angleの影響を物理的に考えてみる。ある程度のattack angleまではその効果が極めて大きいことを示した。これは一言で言えば、図-5の模式図に示すように、attack angleによる拘束の効果が極めて大きいことによる。水平方向の氷の強制変位により、その掘削によって生じる堆積土を含む氷前面部近傍の土塊を介し、またそれを拘束・圧縮す

ることによって地盤内部に土移動が伝達される。これはattack angleが小さい、つまり前面が傾斜した場合に顕著であることが直感的にも理解できる。つまり、attack angleをもつ場合には前面の堆積砂を拘束するとともに、本来の水平方向の強制変位が鉛直方向にも反映し、圧縮力として作用する。さらには、圧縮によって氷前面近傍の砂の密度が増し、そのため氷前面部においてさらに掘削によって堆積する土塊を保持できる容量が増大するためであると考えられる。すなわち、これは、砂の側方流出の減少を意味し、視覚的にも確認された。



- 堆積土+破壊土塊→拘束・圧縮
- 氷前面に保持できる土塊容量大

図-5 attack angle効果の模式図

別途、模型氷の上部を拘束しない条件で行った結果、全ての条件において、氷は掘削距離とともに上方に変位し、いずれ、ある値に漸近する傾向となった。これは、地盤勾配が水平という事と、氷前面への砂の堆積高が定常状態に達するために氷前面の地盤抵抗があまり増加しないためであると考えられる。この鉛直変位機構は木岡等⁵⁾によって述べられている。attack angleが小さくなるにつれて、上方変位量が大きくなり、前述の応力の大きさに対応するattack angleのオーダーと同一であった。これはattack angle効果によるアップリフトが大きく、これを逆に鉛直方向に拘束することによって生じる現象；attack angleが応力に与える効果、というアイデアを示唆しているものと思われる。

(3) 氷の掘削距離にともなう地盤内応力の変化とその鉛直方向の分布

図-6に、地盤内の同じ深さにおけるピーク値(水平方向に3点のセンサーで比較)の比較例を示した。多くの場合、中間位置のセンサーが示す応力が比較的大きな値を示した。これは、センサーの向き(鉛直・水平)、attack angle、移動速度に関わらず概ね同様な傾向を示した。直感的には、氷の前面に堆積する砂の量が氷の掘削距離にともなって増大するため、氷の進行方向の順に応力の値が大きくなっていくことが予想される。進行方向に向かって2つ目までのセンサーの応答値(応力)はこの傾向を示しているが、3つ目のセンサーの応答値は逆に、2つ目のセンサーのそれよりは低下している。これは、砂の氷前面への堆積高は1つ目よりも2つ目の方が明

らかに大きくなるが、2つ目と3つ目ではやや堆積高が増加するものの、前者よりも増加率は顕著でないことを示していると考えられ、事実、視覚的にも確認される。2つ目のセンサーよりも3つ目のセンサーの応答値が減少するという明確な理由は未だ不明であるが、前述のように、地盤の破壊状態あるいは変形状態には膨張あるいは圧縮領域が存在すると考えれば、本実験の状態の範囲内では2つ目のセンサーは圧縮が顕著な領域に含まれ、3つ目のセンサーは膨張気味の領域(圧縮がやや緩和される領域)に含まれていると考えることができる。以上より、実現象においては氷近傍の地盤内の応力は、ある程度までの氷の掘削距離では氷が進行するにつれて増大するが、それ以降では増減を繰り返しているものと考えることが出来る。これはまた、後で述べるよう、氷の掘削距離にともなう水平方向と鉛直方向の反力の推移からも推察される。

次に、地盤内応力の鉛直分布について考察した(図略)。同様に応力の代表値にピーク値を採用した。直感的には深さにもなって応力は減少傾向となると予測できるが、多くの場合、中間位置におけるセンサーの応答値(応力)が比較的小さな値を示した。これも、センサーの向き(鉛直・水平)、attack angle、移動速度に関わらず概ね同様な傾向を示した。これも前述したよう、鉛直方向においても地盤内の破壊状態あるいは変形状態には膨張領域と圧縮領域が存在し、本実験の状態においては中間センサーが膨張気味の変形領域に含まれているとも考えられるが、中間より最下部のセンサーが大きいという事実は、水槽の底面壁面の影響もあると考えられ、今後はこの点に注意して再検証していく必要がある。

以上の結果は、地盤内の破壊あるいは変形は極めて複雑な膨張収縮から成り立っていることを示している。地盤内の膨張収縮破壊は、木岡等⁵⁾の地盤内の過剰間隙水圧の測定結果より、負圧が発生する領域が存在することからも推察できる。

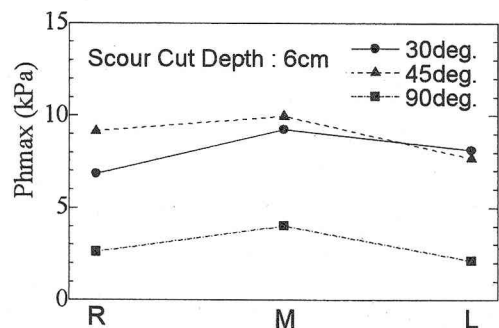


図-6 氷の掘削距離にともなう地盤内応力の変化 (Scour cut depth 以下3cm) (向き；水平方向)

(4) 掘削中における模型氷の水平反力と鉛直反力

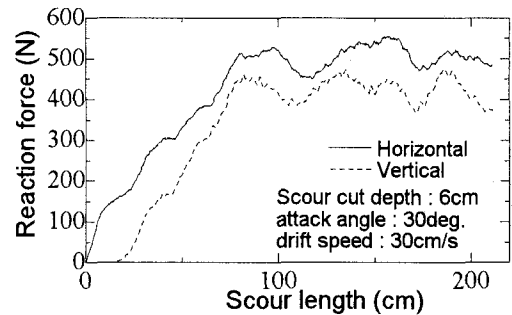
例として、図-7 (a) (b) に、それぞれ30deg., 90deg. の場合における氷の掘削距離(水平方向変位量)にともなう水平方向と鉛直方向の反力の推移を

示す。なお、これらの反力は前述のようにロードセルによって計測されたものである。水平方向及び鉛直方向の反力は、まず30deg., 45deg.については、氷の掘削距離に伴って増加し、ある値に漸近するものと推察される(図-7(a)参照、例として30deg.の場合)。また両者の反力はほぼ同様な推移傾向を示しているのが分かる。これはまず、水平方向の反力の推移は鉛直方向の拘束圧の増大(鉛直反力)に依存し、つまり、拘束圧増大による地盤内のせん断抵抗の増大に起因するものと思われる。またある程度以上氷の掘削距離が増大すれば両反力の増加が抑えられるのは、前述のように氷の鉛直移動を拘束しない scour curve の鉛直上方変位の増加率が減少する場合に説明したことに準じるものと思われる。また、その事とその過程で増減を繰り返すといった現象は、(3)で述べた様に、「地盤内の応力は、ある程度までの氷の掘削距離では氷が進行するにつれて増大するが、それ以降では、堆積砂の増加率は減少すると共に地盤破壊や地盤内変形の膨張収縮領域の存在により、増減を繰り返している」ことに対応しているものと考えられる。また90deg.の場合では、鉛直方向の反力はほとんど作用せず、こうした傾向は見られなかった。また、この場合の水平方向の反力は大きな増減はなく、比較的単調に増加している。これは、水平方向の反力の増加原因は拘束圧によるせん断抵抗の増大よりも、氷前面の堆積砂の増大によるものと思われる。また、両反力の比較では、後にも示されるようにやや水平方向の反力の方が大きい傾向となった。しかしながら逆に言えば、鉛直方向の反力も水平方向の反力と同等に大きいと言える。

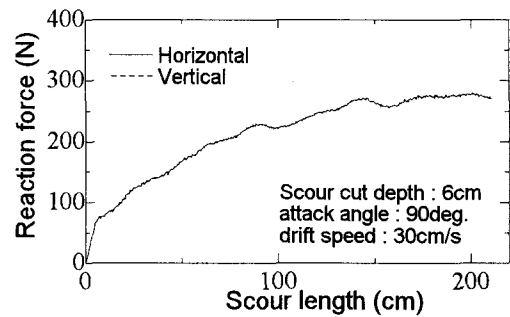
例として図-8に水平反力と鉛直反力との関係の散布図を示す。なお、各反力の代表値として本実験の計測範囲における反力の最大値とした。前項までに議論したことからも推論されるよう、attack angle による両者の反力のオーダーは前述したオーダー(90deg. より30deg., 45deg. の場合では明らかに大きくなるが、30deg. と45deg. の場合では前者の方がやや大きい程度で、attack angleがある程度以上大きくなれば、反力に大きな相違がない)ことが推察された。また30deg., 45deg. の場合、鉛直の拘束圧(反力)の増大とともに水平反力も増大傾向を示したが、90deg. の場合には両反力との間には比例関係が見られなかった。これも前述の、鉛直方向の拘束圧増大にともなうせん断抵抗の増大に起因するものであり、90deg. の場合には大きな拘束圧が作用せず、両反力の値はバラついていて、また鉛直反力よりは、やや水平方向の反力の方が大きい傾向となった。

また両反力の氷の移動速度による依存性を調べた結果、速度に対する違いはほとんど見られなかった。過去の実験条件「水あり」³⁾⁵⁾⁶⁾での結果では、反力は速度の増加と共に上昇することが確認された。これは地盤内の過剰間隙水圧が上昇するためであり、この上昇過程は、氷の移動速度と地盤の粒径の比を用いて表すことができる⁶⁾。「水なし」条件である

本実験結果では速度の依存性がないことから、「水あり」の条件下での速度に伴う反力上昇の主な要因は過剰間隙水圧の発生であることを改めて確認した。



(a) Scour Cut depth: 6cm, 30deg.



(b) Scour Cut depth: 6cm, 90deg.

図-7 氷の掘削距離にともなう水平方向と鉛直方向の反力の推移の例 ((a):30deg.の場合、(b):90deg.の場合)

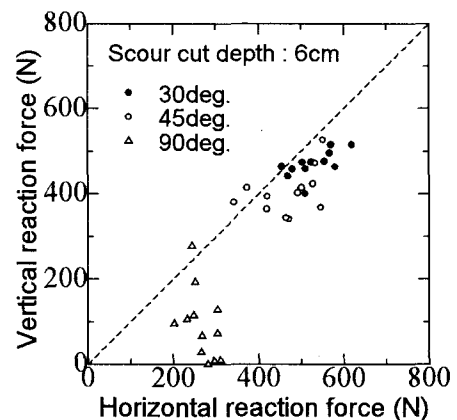


図-8 水平反力と鉛直反力との関係例(各反力の代表値として計測範囲内における反力の最大値を適用)

5. 実験条件の合理化

今後は中規模程度の実験を含み、構造物との干渉など、より実用性に資する実験を実施していく必要がある。本来、本件のような実験はその時間とコスト増に加え、その実験技術の困難さ、それに相似性の面からさまざまな条件で実験するのはきわめて難しいのが現状である。そこで今回得られた基本的な実験の成果と過去の実験結果から、今後より合理的な実験方法を提案してみる。

まず、地盤内の応力あるいは変形挙動はattack angleに大きく依存することは述べたが、30deg. と45deg. では大きな違いはあるというわけではなく、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。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、実験条件として例えば30deg. に固定できれば実験条件を節約することができる。また、移動速度について水平方向の応力は速度に無関係で、鉛直方向の応力についてはやや速度に依存性がみられたが大きく依存するというわけではないので、速度も固定できるものと考えられる。また、一般に長いスパンをもつパイプラインの挙動あるいは破損は局部的な変形によって生じるので、構造物の寸法が大きくない場合には有効応力で評価するのが適当であると思われる。つまり、土移動による有効応力のみを考慮することにし、本実験のように、まずは水なしの条件で実験できるとすれば、かなり実験が容易になる。また、過剰間隙水圧が作用しない場合、過去の研究成果⁶⁾よりscour curve、反力は砂の種類に無関係であるという結論から判断して、応力・変形も、ある範囲内の粒径であれば、砂の種類に無関係であると仮定でき、砂の種類も固定できるものと考えられる。最後に一番厄介な問題ではあるが、相似則の問題が考えられる。特に自重による変形を伴うような地盤の実験には1-g場での実験は不適当で、遠心載荷実験などが実施される場合がある。中規模野外実験と小規模野外実験から⁴⁾、本問題ではangle効果や水平方向の強制変位が支配的であり、力は縮尺比の3乗に比例、scour curveは幾何的相似が成り立つことが示されている。つまり、幾何学的相似を保てば原型とは相似であると仮定でき、本問題も1-g場での実験の適用が仮定できる。今後、中規模野外実験を実施する予定であり、このイベントの相似性について改めて検証し、また物理量の無次元化の可能性についても検討する予定である。更には、模型パイプラインを埋め込み、その挙動についても検討していく。

以上より、多少乱暴ではあるが実現可能性も含めた観点から、1-g場の条件で、速度固定、砂の種類固定、attack angle固定(30deg.) とすれば実験は合理的なものになる。その上でいくつかの地盤の初期状態(相対密度)、それにいくつかのscour cut depthを与え実験すれば良いものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、氷の地盤掘削中における地盤内の応力の基本特性を明らかにし、また、それをもとに今後の合理的な実験方法論について述べた。しかしながら、反省すべき事項としては、用いた水槽の下端部の影響などが考えられる。例えば4.(3)で述べたように、地盤内応力の鉛直方向の分布は、深さにとまって単調に減少するものではなく、ある深さで極小値をもつ可能性があることを示した。これは、

地盤の膨張収縮領域の存在によるものなのか、あるいは、用いた水槽の下端部の影響なのかを明確にできなかった。これは重要な検討項目であるため、前述した「今後の実用性ある合理的な実験」を実施する際には、この点についても注意して実施したい。

また、実用的には土移動によるパイプラインなどの挙動変形・発生応力が問題となる。ゆえに、先に述べた中規模実験で、現象の相似性をまず確認したうえで、得られるパイプラインとの相互作用に関する実験結果を用い、それを推定できる簡易手法等を見出すことが考えられる。一方で、シミュレーションによってパイプラインの挙動・発生応力を推定する手法を開発していく必要がある。その際には、本実験結果は単純な条件下で実施されているものであることから、そのモデルの妥当性をチェックする上で必要な検証用データとしての利用価値があろう。

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) 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.793-809,1998.
- 10) Woodworth-Lynas,C.M.T. : Sub-Scour Deformation and the Development of Ideas from Field Work in the Last Decade, *Proc. of Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop*, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.33-38, 1998.
- 11) Stepanov,I.V.,Timofeye,O.Y.,Klepikov,A.V.and Malek,V. N. : An Approach to the Optimisation of the Burial Depth of Underwater Pipelines on the Arctic Offshore, *Proc.of Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop*, Hokkaido, Japan. Published by C-CORE, pp.59-69, 1998.