

土の凍結膨張における熱流直交方向の凍上性の評価

Evaluation of Characteristics for Frost Heave in Transverse Direction to Heat Flow

北海道大学工学部環境社会工学科	○ 学生員	金内 堯	(Takashi Kanauchi)
北海道大学大学院工学院	学生員	天沼雅香子	(Chikako Amanuma)
清水建設株式会社	正会員	米山一幸	(Kazuyuki Yoneyama)
低温圏工学研究所	正会員	赤川 敏	(Satoshi Akagawa)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江俊仁	(Shunji Kanie)

1. はじめに

近年、インフラ整備や地下トンネルを建設する土木工事において、安全確実な無害工法として注目されている地盤凍結工法がある。この工法における地盤凍結の過程では、周辺構造物への影響予測に凍上現象が大きく関わってくる。凍上現象における凍上量と拘束圧の一次元的な評価には、室内凍上試験から求められる実験式である高志の式¹⁾が広く用いられている。また、上田²⁾は熱流直交方向に一定の拘束有効応力を与える開式三軸凍上実験を行い、熱流直交方向の応力と凍結膨張率との関係を表す実験式を導き出した。

しかし、熱流直交方向の膨張に関する研究はまだ例が少なく、今後、都市部の複雑化した地下空間での凍上性の予測には熱流方向だけでなく熱流直交方向の凍上性の評価がより重要になると考えられる。

本研究では、熱流直交方向への凍上性を評価するために変位ではなく応力に注目し、昨年度、天沼ら³⁾が開発した熱流直交方向応力測定装置を使用し、開式三軸凍上試験を行った。試料には、凍上性の違いが熱流直交方向の凍上性に及ぼす影響を調べるため、一般的に凍上しやすいといわれる土丹の再構成試料(以下「土丹」と)と凍上しないといわれる豊浦標準砂(以下「標準砂」)を用いた。

以上からこれらの試料を用いた実験を行った結果を比較することで、熱流直交方向への凍上性を評価する。

2. 熱流直交方向応力測定装置

図1に示すような、3個の小型水圧計とひずみゲージを用い熱流直交方向に発生する応力を測定している。小型水圧計は一枚の厚さが10mmのアクリルリングNo.2, No.4, No.6の内周面に設置しており、アクリルリングが受ける液圧を計測している。ひずみゲージは全てのアクリルリングの外周面に各4枚(フルブリッジ)設置され、アクリルリング外周の周方向のひずみを計測し、厚肉円筒理論によってアクリルリング内周面の半径方向直応力に変換している(以下「SG」)。また熱流方向への変位量にはレーザー変位計を、吸水量はビュレットへの水の出入りを差圧計から読み取っている。

データ整理において、小型水圧計は液圧用の測定器であるので、試料から受ける熱流直交方向の応力を正確に測定できているかという点で課題が残る。そのため今回の研究ではSGでのデータを使用した。

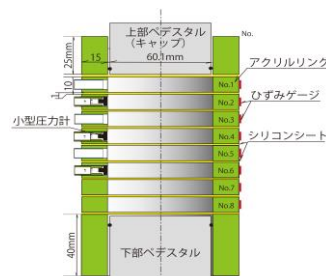


図-1 凍上セル

3. 実験条件

供試体高さは土丹 92 mm, 標準砂 93.5 mmであり、凍結速度、温度勾配をそれぞれ標準的な 1.0(mm/hr), 0.1(°C/mm)に設定した。上載圧は一般的な凍結工法に相当すると考えられる 50kPa, 100kPa, 200kPa で実験を行った。

4. 実験結果

以下の図2は土丹、標準砂それぞれの上載圧での熱流方向変位量と吸水量の比較である。

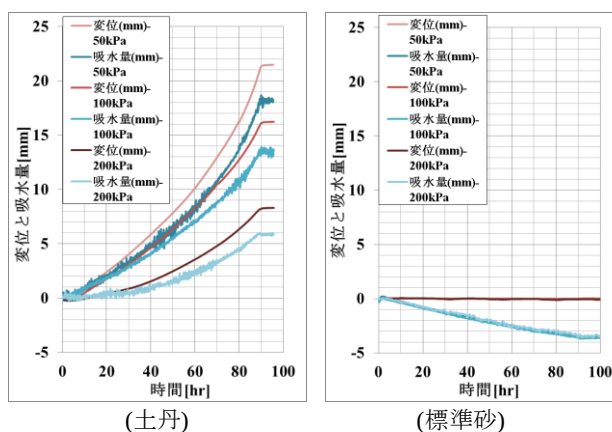


図-2 熱流方向変位量と吸水量

土丹において、熱流方向変位量、吸水量ともに上載圧が大きいくほど小さくなっている。これは高志の式による凍上量の熱流方向拘束圧依存性と合致する。標準砂においては、熱流方向変位量はおおよそ0である。吸水量に関しては土中の水分がその場で氷に相変化(その場凍結)することで間隙水が排水されていることがわかる。

次に土丹、標準砂それぞれ上載圧 200kPa 条件での温度変化によるアクリルリング内周面に発生する直応力(以下「側圧」)の増加量をグラフにまとめたものを以下に示す(図3, 図4)。SG-No1, No2 については、供試体で

はなくキャップに接していたため、側圧を測れなかった。そのため今回は掲載を省く。

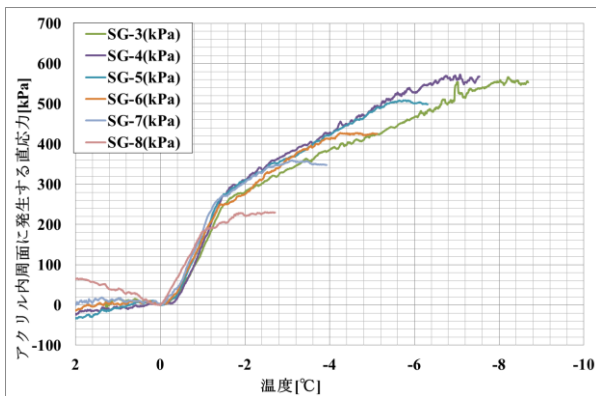


図-3 温度変化による側圧の増加量（土丹）

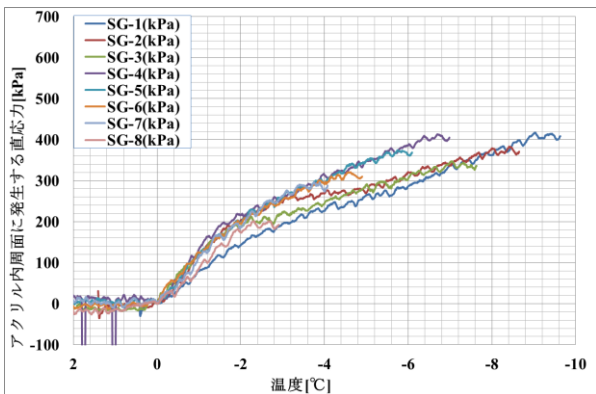


図-4 温度変化による側圧の増加量（標準砂）

土丹、標準砂ともに、0°C付近(0~-1.5°C)で急激な増加(以下「急激な上昇」)その後(-1.5°C以下)は穏やかな側方応力の増加(以下「穏やかな上昇」)がみられる。またリングによらず急激な上昇、穏やかな上昇ともに概ね似た傾向を示しているが、収束応力は凍上セル上方の、No. が小さいリング、すなわち温度が低いリングほど大きな側圧が観測されている。

次に、土丹と標準砂をより細かく比較するため SG-No.4 に注目してそれぞれの上載圧での経時挙動を以下の図5、図6にまとめた。

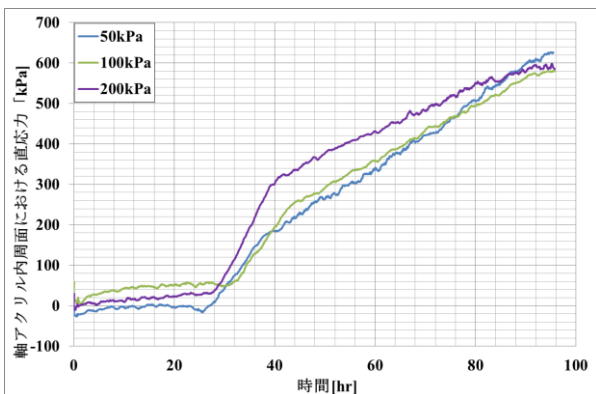


図-5 時間変化による側圧の増加量(土丹)

土丹では、急激な上昇の傾きは上載圧が大きいほど大きく、穏やかな上昇の傾きは上載圧が大きいほど小さくなっている。

上載圧によって急激な上昇の際、側圧に差が生じて、時間経過による温度低下によって同じ値に収束している。

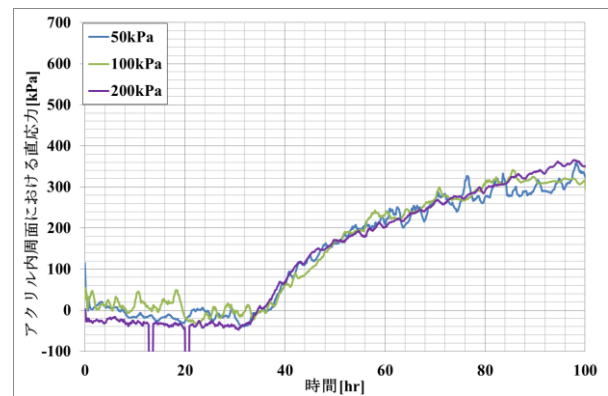


図-6 時間変化による側圧の増加量(標準砂)

標準砂では急激な上昇、穏やかな上昇ともに上載圧によらず、同じような挙動を示している。

5. 考察・まとめ

図5より、側圧は上載圧が大きいほど急激な上昇の傾きが大きくなっている。熱流方向変位量が抑えられた分、0°C付近で熱流直交方向に側圧が大きく出ていると考えられる。一方で標準砂では、変位量、吸水量、0°C付近の側圧の急激な上昇のすべては上載圧によらず一定である。しかし、図6から、凍上しない標準砂において、熱流方向変位量は0であり、排水されたにも関わらず、急激な上昇は同様にみられる。

つまり、この側圧の増加分には少なくとも水から氷への相変化によって起こる体積膨張によるものが含まれていると考えられる。これをさらに裏付けるために、流動性をもたない水として、寒天を試料に用いて三軸凍上試験を行っていく予定である。

また、土丹、標準砂において、実験終了時での側圧は上載圧によらず収束している。土丹においては、急激な上昇の際での過程は異なるが、標準砂では急激な上昇も上載圧によらない。このことから、本実験での側圧の最終値は、凍上現象の発生の有無、上載圧は関係なく、試料の含水比や温度、その他の原因によって決定されている可能性があると考えられる。

今後は凍上を起こす試料での実験のサンプル数を増やすために、石英粉砕シルトとカオリンを様々な比率で混合し実験を重ねることで、0°C付近の側圧の急激な上昇と上載圧の関係性、凍上量の割合と側圧の増加量の関係性などを詳しく調べていきたい。

6. 参考文献

- 1) 高志勤，生頼孝博，山本英夫，岡本純：砂凍土の一軸圧縮強さに関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 302，pp. 79-88，1980
- 2) 上田保司，生頼孝博：未凍土の側方歪が直角方向への凍結膨張率に及ぼす影響，日本雪氷学会，2004
- 3) 天沼稚香子：土の凍結膨張における熱流直交方向の発生応力測定装置の開発，土木学会年次技術講演会講演概要集（CD-ROM）Vol.70，2015