

土の凍結膨張における熱流直交方向の応力挙動

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	天沼稚香子	(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、熱流直交方向の応力挙動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応力挙動に及ぼす影響を調べるため、凍上しやすいといわれる土丹の再構成試料(以下「土丹」)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、熱流直交方向の応力挙動を評価する。

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 10 mm 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。

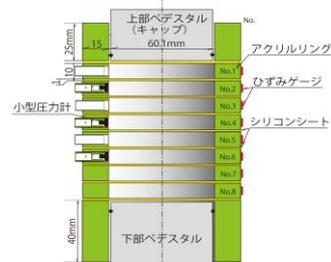


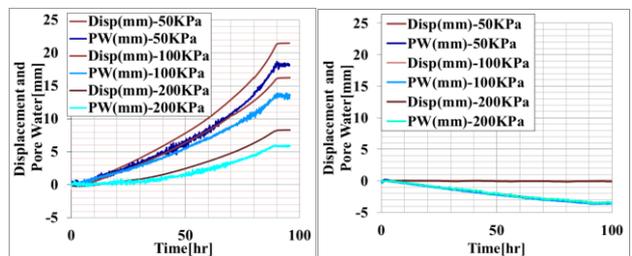
図-1 凍上セル

3. 実験条件

温度勾配は 0.1(°C/mm)とし、供試体内で常に一定であるように上下ペDESTALの温度を管理した。セル上方から凍結速度 1.0(mm/hr)で凍結を進行させた。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。



(土丹) (標準砂)

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、熱流方向変位量、吸水量ともに上載圧によらず一定の挙動を示しており、熱流方向変位量はおおよそ 0、吸水量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 50KPa 条件での時間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-1,2 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。

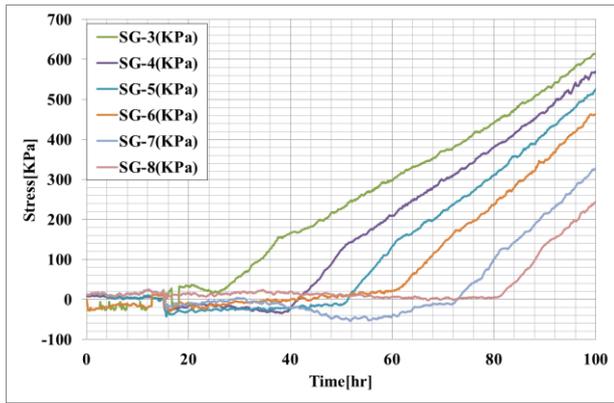


図-3 時間変化による側圧の増加量(土丹)

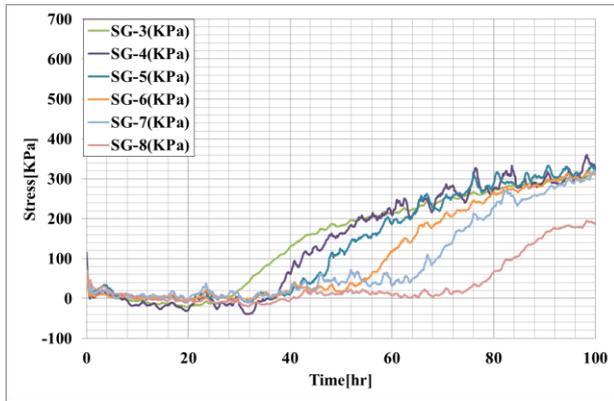


図-4 温度変化による側圧の増加量(標準砂)

土丹, 標準砂ともに, 側圧は凍上セルの上方から順に, 10 時間ほどかけての急激な増加(以下「急激な増加」)が観測されている. このときリングの温度は, SG-3 がおよそ 30 時間後から増加が始まり, 凍結速度が 1.0 mm/hr, 各リングが 10 mm であることから, 0°C 付近(0~-1.5°C)であることがわかる. 急激な増加後(-1.5°C 以下)は穏やかに増加を続けるが(以下「穏やかな増加」), これらの二つの傾向はリングによらず同様である. また, 実験終了時の側圧は凍上セル上方の, 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.

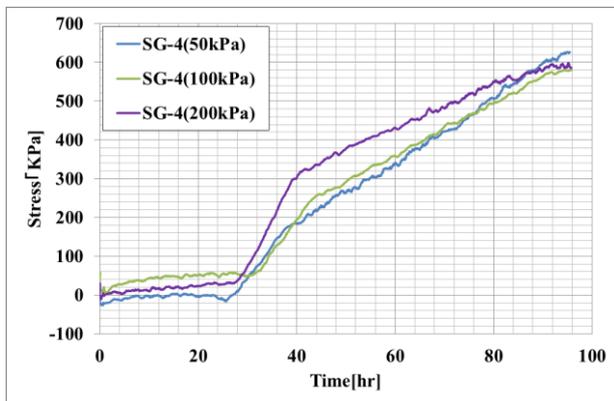


図-5 時間変化による側圧の増加量(土丹)
土丹では, 急激な増加, 穏やかな増加ともに上載

圧の影響を受けていることがわかる. しかし, 実験終了時の値は, 増加の過程で上載圧による差が生じても, 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.

一方, 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.

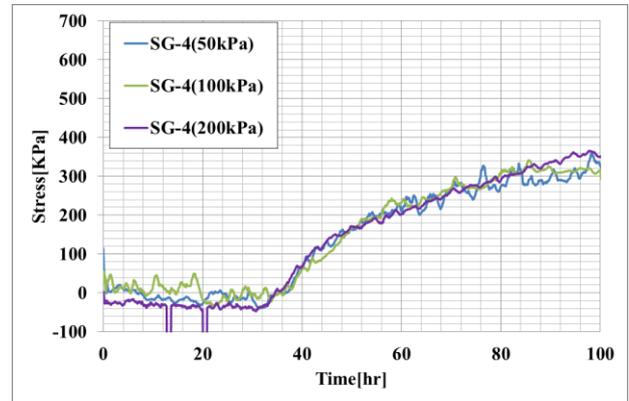


図-6 時間変化による側圧の増加量(標準砂)

5. 考察・まとめ

図 2 より, 熱流方向変位量, 吸水量に関して, 土丹には凍上現象が発生しており, 上載圧の影響を大きく受けている. 一方, 標準砂では凍上現象は発生していないため, 上載圧の影響を受けずに一定の挙動を示している. しかし, 側圧の変化をみると, 土丹, 標準砂ともに急激な増加は見られる. 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.

図 5 より, 土丹において, 上載圧が大きいほど急激な増加の傾きが大きくなっている. 上載圧により, 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たと考えられる. 一方, 標準砂では 0°C 付近の急激な増加の傾きは上載圧によらず一定である. このように増加の過程で差はあるが, 実験終了時の側圧の値は土丹, 標準砂ともに収束している. 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, 標準砂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