

凍上性・非凍上性試料の凍結による熱流直交方向応力に関する基礎的研究

Fundamental Study on the mechanism of transverse stress by the freezing of frost susceptible and non-susceptible materials

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 富山 果子 (Kako Tomiyama)
北海道大学大学院工学院 非会員 湯原 進二 (Shinji Yuhara)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 鄭 好 (Hao Zheng)

1. 諸言

近年、注目されている地盤改良工法として地盤凍結工法がある。この工法における地盤凍結過程においては、周辺構造物への影響を予測するため凍上現象による体積膨張変化を検討しなければならない。凍上現象における凍上量と拘束有効応力と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が広く用いられている。また、上田は凍結線膨変位の発現方向特性を定量的に扱う国内外を通じて初めての実験式として、熱流および直角方向の凍結線膨張率を応力の関数で表す三軸凍上実験式を導いた。

本研究では、熱流直交方向の凍上性を評価するため応力に注目し、側方を拘束して三軸試験を行うことが可能な凍上セルを使用して開式三軸試験を行った。試料には、凍上性のある試料と凍上性のない試料(非凍上性試料)を用いた。一般に、粒径が 0.1mm 以上の砂では凍上がほとんど起こらず、0.05~0.1mm の粒を含む土から凍上が起こり始める。

以上から、これらの試料を用いた試験結果を比較して熱流直交方向の凍上性を評価する。

2. 三軸凍上試験

2.1 三軸凍上試験装置

図-1 には凍上セルを示す。アクリルリングを8枚積層した構造になっている。また、止水とリング間の影響を少なくする目的でつなぎ目にシリコンシートを使用している。各リングの外周にはひずみゲージが設置されており、凍結時の熱流直交方向ひずみを測定できる。本研究では、そのひずみから応力を算出した。さらに、各リングには温度計も設置してあるため、温度と応力の関係が得られる仕組みになっている。

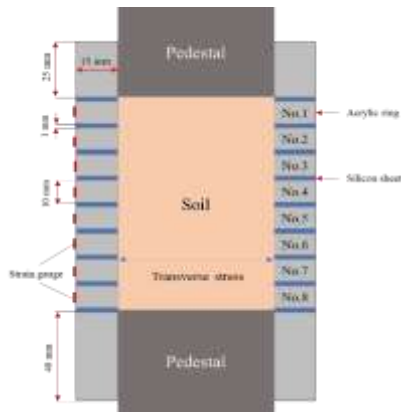


図-1 凍上セル

実験装置の概要は以下図-2 に示す。実験室外に設置された恒温水槽で不凍水の温度をコントロールし、それを循環させることで試料の温度を調節している。また、供試体上下からの給排水も可能となっている。熱流方向の変位は、レーザー変位計にて計測している。

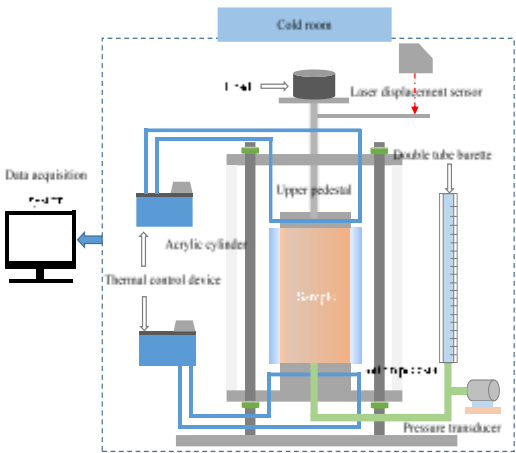


図-2 凍上試験装置

2.2 三軸凍上試験条件

実験諸条件は表-1 に示す。

表-1 実験諸条件

実験室温度	1.0℃
凍結速度	1.0mm/hr
温度勾配	0.1℃/mm
熱流方向拘束圧	100kPa

試料に関して、非凍上性の試料として豊浦標準砂を選定した。豊浦標準砂は細粒分を取り除くため米とぎの要領で洗ったものを使用した。次に、凍上性のある試料として土丹を選定した。豊浦標準砂は粒径が大きいためアイスレンズができにくい一方で、土丹はアイスレンズができやすい粒径をしている。各試料の粒径は、以下表-2 に示す。

表-2 試料の粒径

豊浦標準砂	0.25-0.30mm	13%
	0.18-0.25mm	74%
	0.075-0.18mm	13%
	-0.075mm	0%
土丹	2-75mm	0%
	0.075-2mm	24%
	0.005-0.075mm	48%
	-0.005mm	28%

3. 試験結果

3.1 熱流方向の変位と吸水量

熱流方向の変位と吸水量、上下ペDESTALの温度（上部ペDESTAL： T_c 、下部ペDESTAL： T_w ）の継時変化のグラフを以下に示す。

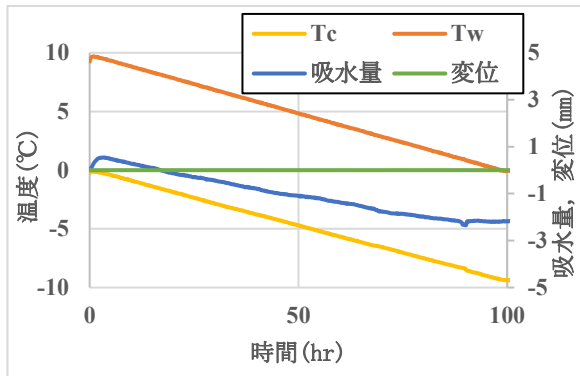


図-3 豊浦砂：温度、吸水量、変位の継時変化

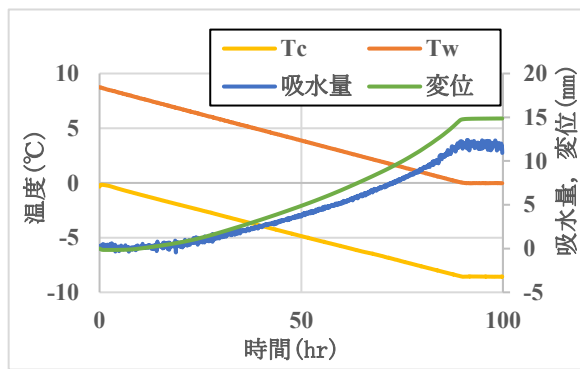


図-4 土丹：温度、吸水量、の継時変化

これより、豊浦標準砂は熱流方向の変位が発生せず、凍上性がないことが確認できた。また、上部から温度を下げるため上部から凍結していく。その膨張により、排水がすすんでいる。

一方、土丹は凍上していることが確認できた。温度を下げるほど吸水し、それとともに凍上量は増加した。温度の低下が止まると凍上量も横ばいとなった。

3.2 熱流直角方向応力の温度依存性

次に、ひずみゲージ(SG : Strain Gage)から得られた熱流直角方向応力の温度依存性について以下のグラフに示す。

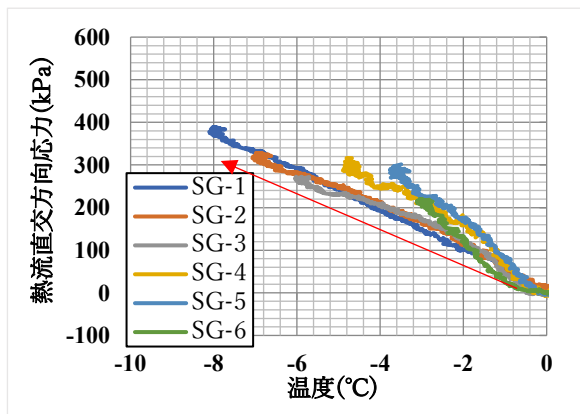


図-5 豊浦標準砂：応力の温度依存性

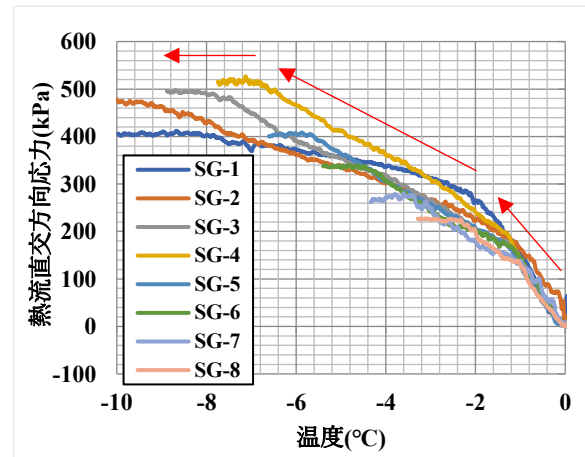


図-6 土丹：応力の温度依存性

豊浦標準砂は、緩やかに応力が増加した。最終的に 300kPa ほどまで大きくなった。一次関数的に応力増加していることから、応力の発生原因はひとつであり、試料の間隙水がその場で凍結した膨張分によるものではないかと考えられる。

一方、土丹は $0 \sim -2^\circ\text{C}$ までは急激に応力増加し、その後はゆるやかに増加していく bi-linear 型の挙動を見せる。最終的に 500kPa まで増加した。非凍上性試料と比べて大きい結果となった。アイスレンズは 0°C 付近で成長することから、 $0 \sim -2^\circ\text{C}$ の急激な応力増加はアイスレンズの発生によるものであり、 -2°C 以降は豊浦標準砂と同じように一定の割合で応力増加しているため、試料の間隙水が凍結した膨張分によるものであると考えられる。また、 -8°C 以降は応力増加せず、横ばいとなった。これは、間隙水がなくなり凍結が進行しなくなったためであると考えた。

4. まとめ

本研究では、凍上時の熱流直角方向の体積膨張に着目して三軸凍上試験を行い、凍上性と非凍上性の試料を用いた試験結果の比較からその違いを評価した。どちらの試料も熱流直角方向に応力を生じた。しかし、応力の大きさと発生過程のメカニズムに違いがみられた。その違いから、アイスレンズの発生により熱流直角方向に応力がはたらいっているのではないかと考えた。

参考文献

- 1) 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学-凍上被害とその対策-，中西出版，2009
- 2) 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)
- 3) 上田保司：土の凍結膨張による地盤変形および発生応力の予測と対策に関する研究，京都大学大学院工学研究科学学位論文，pp. 6，2007
- 4) 木下誠一：凍土の物理学，森北出版，1982
- 5) 細野康代：土木学会第 64 回年次学術講演会（平成 21 年 9 月），豊浦砂の粒度分布