

土の凍結膨張における熱流直交方向ひずみの評価

Characteristics of Frost Heave Strain in Transverse Direction to Heat Flow

北海道大学工学部環境社会工学科 ○ 学生員 栗城 雅史 (Masashi Kuriki)
 北海道大学大学院工学院 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)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 鄭 好 (Hao Zheng)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 蟹江 俊仁 (Shunji Kanie)

1. 緒言

近年、道路・パイプラインなどのライフライン網構築における様々な場面で、注目されている工法として地盤凍結工法がある。しかしこの工法において、土が凍る際の凍上現象により、体積膨張変化の予測精度が課題となることがある。凍上現象とは、土が凍るときにレンズ上の氷の層(アイスレンズ)の形成により、単に土中の水分が氷になる相変化よりも膨張率が大きくなる現象である。

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¹⁾がある。また、上田²⁾は熱流方向、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、応力と凍結線膨張率との関係を表す実験式を導き出した。しかし、熱流直交方向の膨脹に関する研究は例が少ない。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直交方向の凍上性の評価が重要になると考えられる。

本研究では、熱流直交方向の凍上性を評価するためにひずみに注目し、図-1に示す実験装置³⁾を用いて開式の三軸凍上試験を行った。試料には、一般に凍上するといわれるシルト質土であるMZカオリンと凍上しないといわれる豊浦標準砂を混合したものを用いた。

以上からこれらの試料を用いた実験を行った結果を用いて、熱流方向ひずみと熱流直交方向ひずみの関係性を検討する。

2. 熱流直交方向の凍結膨張ひずみ

図-1に示すような凍上セルを用いて、各リングに設置したひずみゲージから外周周方向ひずみを測定する。ここから熱流直交方向の半径方向直応力を求めるために厚肉円筒理論を用いると以下の式(1)で表される。

$$\begin{Bmatrix} -\sigma_r(a) \\ \sigma_r(b) \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} - \alpha \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix} \varepsilon_t \quad (1)$$

ただし、

$$[K] = \alpha \frac{1}{a^2 - b^2} \begin{bmatrix} -a - (1-2\nu)b^2/a & 2(1-\nu)b \\ 2(1-\nu)a & -b - (1-2\nu)a^2/b \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

a : アクリル・モールド内面半径, b : アクリル・モールド外面半径, u_a : アクリル・モールド内面変位, u_b : アクリル・モールド外面変位, σ_r : アクリル・モールドの半径方向直応力, E : 弾性係数, ν : ポアソン比, ε_t : 温度

膨張ひずみ

ただし、弾性係数、ポアソン比、 α についてはアクリル、供試体の材質ごとに定義するため、以降添え字の a および s を付すものとする。

これにより、アクリル・モールドの半径方向直応力が求まった。次に供試体が凍結膨張したときの凍結膨張ひずみを ε_f とおき、供試体外周における半径方向応力を示すと、式(2)のようになる。

$$\sigma_r(a) = \alpha_s \frac{u_a}{a} - \alpha_s \varepsilon_f \quad (2)$$

式(1), (2)より、供試体の凍結膨張ひずみを求める補正式は以下のようになる。

$$\begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 - b^2 & -a(1-\beta) - (1-2\nu_a + \beta)b^2/a \\ & 2(1-\nu_a)a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 2(1-\nu_a)b \\ -b - (1-2\nu_a)a^2/b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta \varepsilon_f \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ただし、

$$\beta = \frac{\alpha_s}{\alpha_a}$$

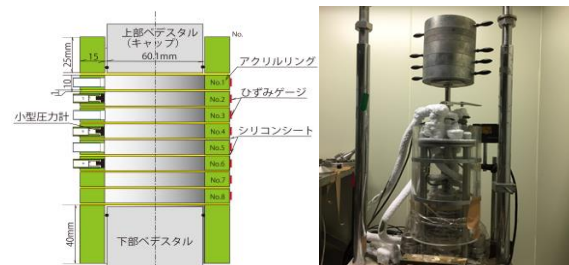


図-1 凍上セル実験装置

3. 三軸凍上試験

試料は、豊浦標準砂(25%)MZカオリン(75%)の混合土(以下試料A)と豊浦標準砂(50%)MZカオリン(50%)の混合土(以下試料B)を使用した。実験条件を表1に示す。

図-1に示した実験装置を使用し三軸凍上試験を行った。熱流方向の変位量は、レーザー変位計により計測した。また、計測した外周周方向ひずみから供試体の凍結膨張ひずみを計算した。以下計算条件を表2に示す。

表1 実験条件

	試料 A			試料 B		
上載圧(KPa)	50	100	200	50	100	200
供試体高さ(mm)	94	83	74	97	81	72
凍結速度(mm/hr)	1.0					
温度勾配(°C/mm)	0.1					

表2 計算条件

a (mm)	b (mm)	ν_a	ν_s	β	E_a (GPa)
30	45	0.3	0.3	0.05	3.5

また変位 u_b に関して、外周周方向ひずみとアクリル・モールド外面半径を乗じることで計算した。

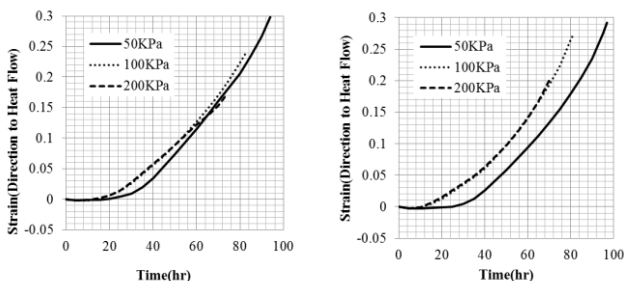
次に凍土の一軸圧縮試験⁴⁾から、 -5°C の下において粘性土である藤の森粘土の変形係数 E_{50} が求められる。これらとアクリルの弾性係数を用いて β は 0.04 と算出される。また、今回使用した試料は、粘性土であるカオリンと標準砂の混合土であり、弾性係数は粘性土と比べて大きいと考えられることなどを参考に、今回 β を 0.05 と設定した。

4. 試験結果

まず、試料 A, B それぞれの上載圧での時間経過に伴う熱流方向ひずみを図-2 示す。試料 A, B ともに時間経過に伴い、熱流方向ひずみは二次曲線的に増加している。また、実験終了時のひずみが上載圧と反比例している。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。

次に、試料 A, B それぞれの上載圧での時間経過に伴う熱流直交方向ひずみを図-3 示す。試料 A, B ともに時間経過に伴い、熱流直交方向ひずみは二次曲線的に増加する。試料 A に関して、上載圧が 200KPa, 100KPa, 50KPa の順でひずみが大きくなっているが、試料 B は上載圧が大きい順にひずみが大きくなっている。

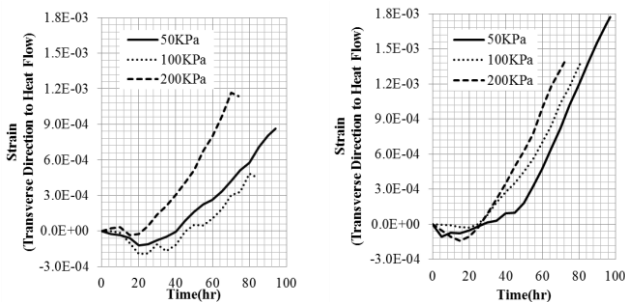
図-2, 3 で得られた結果から、熱流方向ひずみと熱流直交方向ひずみの関係性を試料 A, B それぞれ図-4, 図-5 に示す。試料 A, B それぞれ熱流方向ひずみと熱流直交方向ひずみの間には線形の関係がある。試料 B の傾きは、試料 A に比べて小さい。



試料 A

試料 B

図-2 時間経過に伴う熱流方向ひずみの変化



試料 A

試料 B

図-3 時間経過に伴う熱流直交方向ひずみの変化

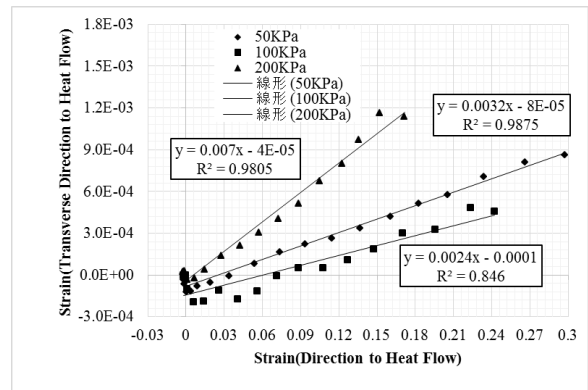


図-4 熱流と熱流直交方向ひずみの関係(試料 A)

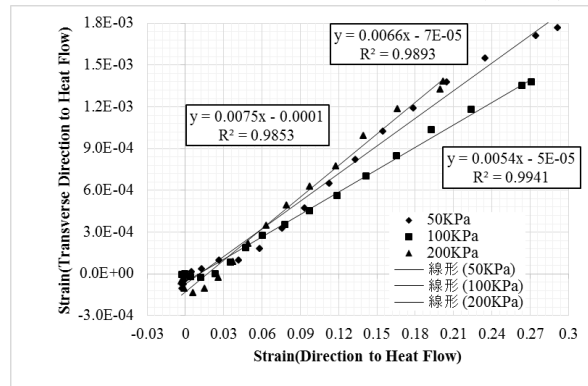


図-5 熱流と熱流直交方向ひずみの関係(試料 B)

5. 考察, 展望

図-4, 5 より、熱流方向ひずみと熱流直交方向ひずみには比例関係があり、凍結が進むにつれて両者ともある一定の割合で膨張することがわかる。また試料 A, B それぞれの線形近似の傾きから、熱流方向ひずみに対する熱流直交方向ひずみの割合は、それぞれ 0.24%~0.70%, 0.54%~0.75%である。図-2, 3 の結果と合わせて、標準砂の割合が大きい試料 B では標準砂によって熱流方向への膨張は抑えられ、熱流直交方向の膨張は助長されていると考えられる。

また、図-4, 5 において、上載圧と線形近似の傾きの大きさに注目すると、100KPa, 50KPa, 200KPa の順で傾きは大きくなっている。現時点では、上載圧との関係は見いだせないと考えられる。

今後は、今回用いた試料 A, B とは異なる配合で実験を行い、熱流方向ひずみと熱流直交方向ひずみの関係性を詳細に調べていきたい。また、三次元的な膨張予測に対する検討を行ってきたい。

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, 日本冰雪学会(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)
- 4) 土質工学会編:土の凍結-その制御と応用-土質基礎ライブラリー(1982)