

三軸凍上実験に基づく三次元凍上率評価式に関する基礎的検討

Fundamental Study on the Frost Heave Evaluation based on Tri-Axial Frost Heave Experiments

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生会員 高橋翔平 (Shohei Takahashi)
 (株) 精研技術開発部 正会員 上田保司 (Yasushi Ueda)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 蟹江俊仁 (Shunji Kanie)

1. まえがき

永久凍土と非永久凍土が混在する北方圏において、凍土の融解およびパイプの損傷を防ぐために、冷却ガスパイプラインの地中埋設が提案されている。また、地震等の災害に対して安全なLNGの貯蔵方法としてLNGタンクの地中化が注目されている。しかし、低温環境に曝されるこれらの地中埋設型構造物には、凍上現象による変形・破損などの被害が懸念される。こうした問題を解決するためには凍土と地中埋設構造物の相互作用を適切に評価する必要がある。特に地中埋設構造物と周辺凍土との間に作用する応力の評価と予測技術の確立が期待される。しかしながら、既往の研究では凍上の予測式には一次元の凍結膨張率が用いられているのが現状であり、現実に即した三次元の問題に適用できるものではない。

そこで本研究では、既存の一次元凍上予測式である高志の式を三次元拡張し、室内実験の結果と比較することで、解析の妥当性を検討し、地中埋設構造物の凍上挙動予測をより実現象に近づけることを目的とする。

2. 実験方法

解析に用いる実験データは上田らによる三軸凍上実験¹⁾によるもので、凍結中に脱水圧密がほとんど生じない藤の森粘土を1MPaで予圧密を行った後、実験中は拘束応力を一定に保ち、凍結速度 U を $U=2\text{mm/hr}$ として行ったものである。また、後述する ξ_3 ：熱流直角方向凍結線膨張率の計測には供試体下端より5, 15, 25, 35mmの4ヶ所×2半径方向の計8ヶ所をノギスで測定しその平均の変位量 Δr から $\xi_3 = \Delta r / r$ により求めている。しかし、実験途中からは以下に示す式2.1による計算値と実験値とが良く一致していたため、式2.1の計算のみで ξ_3 を求めている。

$$\xi_3 = \sqrt{\frac{\beta + (1 + \Gamma) \cdot \xi_w + 1}{1 + \xi_1}} - 1 \quad (\text{式 2.1})$$

ここに、 ξ_w ：吸排水率、 β ：元々土が保持している水分による凍結膨張率、 Γ ：水の凍結膨張率である。

3. 凍上率の評価式

3.1 一次元凍結膨張率予測式としての高志の式

凍上挙動の予測には、凍上過程における水の移動を考慮した式(3.1)に示す高志の式と呼ばれる実験式が広く用いられている。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \quad (\text{式 3.1})$$

ここに、 σ ：凍結方向の有効応力、 U ：凍結速度、 ξ ：凍上率を表す。また ξ_0 、 σ_0 、 U_0 は対象土の内部要因のみに依存する固有値である。式3.1は一次元での凍上量を

予測するものであり、凍結方向の有効応力と凍結速度が大きいかほど、凍上率が小さくなることを示している。

3.2 三次元への拡張モデル

前節で述べたように、式3.1に示す高志の式は一次元での凍上率を予測するものである。寒冷地における自然凍結では、凍土は地表面から一次的に凍上するため、凍結膨張変位は熱流方向にのみ発生する。これに対し、冷却ガスパイプラインによる地盤内部からの凍結では、凍結膨張変位は熱流方向だけでなく熱流直角方向にも発生する²⁾。そこで、本研究では式3.1における ξ ：凍上率に以下の式(3.2)、(3.3)に示す二案の補正係数 α を乗じることで、熱流方向の長さの変化率である ξ_1 ：熱流方向凍結線膨張率と熱流直角方向の長さの変化率である ξ_3 ：熱流直角方向凍結線膨張率を計算する。

$$\alpha_1 = \frac{\sigma_2 + \sigma_3 - \sigma_1 - 1/2|\sigma_2 - \sigma_3|}{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3} \quad (\text{式 3.2})$$

$$\alpha_3 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_3 - 1/2|\sigma_1 - \sigma_2|}{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}$$

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3} \right) \quad (\text{式 3.3})$$

ここに、 σ_1 ：熱流方向の拘束応力、 σ_2 、 σ_3 ：熱流直角方向の拘束応力である。また、本研究に用いた実験データは熱流直角方向の応力 σ_2 、 σ_3 は等応力状態のものであるので、補正係数 $\alpha_2 = \alpha_3$ である。

3.3 高志の式の定数のフィッティング

前節で示した凍結線膨張率を求めるために、三軸凍上実験によるデータから最小二乗法により高志の式の定数を定める必要がある。しかしながら、式3.1からわかるように、高志の式は定数 ξ_0 、 σ_0 、 U_0 に関して非線形であることから以下に示すNewton法により求める。

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\xi_i - \left\{ \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \right\} \right]^2$$

$$\begin{Bmatrix} \xi_0 \\ \sigma_0 \\ U_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0 \partial \sigma_0} & \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0 \partial U_0} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0 \partial \sigma_0} & \frac{\partial^2 S}{\partial \sigma_0^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial \sigma_0 \partial U_0} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0 \partial U_0} & \frac{\partial^2 S}{\partial \sigma_0 \partial U_0} & \frac{\partial^2 S}{\partial U_0^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial S}{\partial \xi_0} \\ -\frac{\partial S}{\partial \sigma_0} \\ -\frac{\partial S}{\partial U_0} \end{Bmatrix} \quad (\text{式 3.4})$$

式3.4により、三軸凍上実験のデータから定数 ξ_0 、 σ_0 、 U_0 を求めようとしても、 U_0 が負に収束していき、正しい収束値を得ることが出来ない。そこで本研究では、次章に示すように高志の式を修正し、対応することとした。

4. 三次元化に向けての考察

4.1 上田らによる凍結線膨張率

上田らは凍結線膨張率と拘束応力との関係を表す実験式として式 4.1 を、凍結線膨張率と拘束応力、凍結速度との関係を表す式として式 4.2 に示す実験式を提案している³⁾。

$$\xi_1 = a + \frac{b \cdot \sigma_3 + c}{\sigma_1} \tag{式 4.1}$$

$$\xi_1 = a + \frac{b \cdot \sigma_3 + c_0 + c_1 / \sqrt{U}}{\sigma_1} \tag{式 4.2}$$

ここに、 a, b, c, c_0, c_1 は定数であり本研究では三軸凍上実験結果からその値を最小二乗法により求めている。図 1 に三軸凍上実験による熱流方向の凍結線膨張率と式 4.1 による計算値との比較を、図 2 に式 4.2 による計算値と三軸凍上実験値との比較を示す。最小二乗法により得られた式 4.1 の定数 a, b, c はそれぞれ-0.01825, 0.02887, 0.006076 である。決定係数 R^2 は 0.925 であり、図 1 より上田らによる熱流方向の凍結線膨張率の計算値は実験値と良く一致した傾向にあるといえる。同様にして、式 4.2 の定数 a, b, c_0, c_1 はそれぞれ-0.008185, 0.02857, -0.01486, 0.02760 であり、決定係数 R^2 は 0.947 となりこちらも実験値と良く一致した傾向にあるといえる。

4.2 Newton 法適用のための高志の式の修正

3.3 節で述べたように、式 3.1 に三軸凍上実験結果を当てはめ最小二乗法を適用しても収束値が得られない。最小二乗法を適用し、定数 ξ_0, σ_0, U_0 を求めることができるよう高志の式を修正したものが式 4.3 である。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} + \frac{U_0}{\sqrt{U}} \tag{式 4.3}$$

式 4.3 は定数 ξ_0, σ_0, U_0 に関して線形化した式であり、Newton 法を用いずに定数を求めることができる。この式 4.3 による計算値と三軸凍上実験の実験値との比較を図 3 に示す。決定係数 R^2 は 0.788 であり、実験値に良く一致した傾向にあるといえる。さらに式 4.3 に式 3.2, 式 3.3 に示す補正係数を乗じ、最小二乗法により定数 ξ_0, σ_0, U_0 を決定し実験値と比較したグラフを図 4 に示す。式 3.2 を適用した場合の定数は $\xi_0 = -0.4774, \sigma_0 = 0.006803 \text{ MN/m}^2, U_0 = 0.8219 \text{ mm/hr}$ であり、決定係数 R^2 は 0.795 と実験値に近い値となっている。同様にして式 3.3 を適用した場合は $\xi_0 = -0.6067, \sigma_0 = 0.01488 \text{ MN/m}^2, U_0 = 0.9849 \text{ mm/hr}$ であり、決定係数 R^2 は 0.926 である。このことから式 3.3 のほうがより実験値に近い値が得られることがわかった。しかし、式 3.3 は σ_1 と σ_3 の大小関係によって負の凍結線膨張率を計算できないため、実験データによっては誤差が大きくなる場合も考えられる。

5. あとがき

本研究では三軸凍上実験を基に、三次元凍上率の評価式として、式 3.1 に示す高志の式を三次元拡張するにあたって、高志の式をそのまま適用することは出来ないことが検証された。そこで上田らによる凍結線膨張率の実験式を参考に三軸凍上実験結果にも適用できるよう高志の式を修正した結果、 ξ ：凍上率、 ξ_1 ：熱流方向凍結線膨張率ともに実験結果に近い解析結果を得られた。今後の

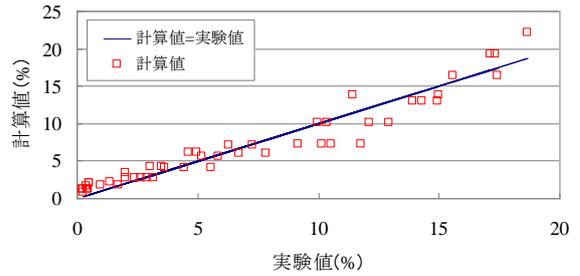


図 1 式 4.1 による凍結線膨張率の比較結果

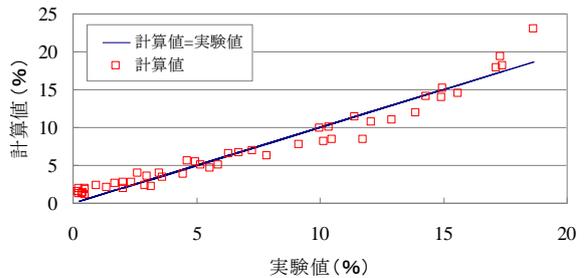


図 2 式 4.2 による凍結線膨張率の比較結果

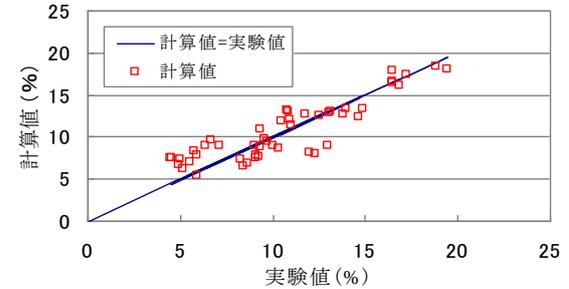


図 3 修正高志の式の三軸凍上実験との比較結果

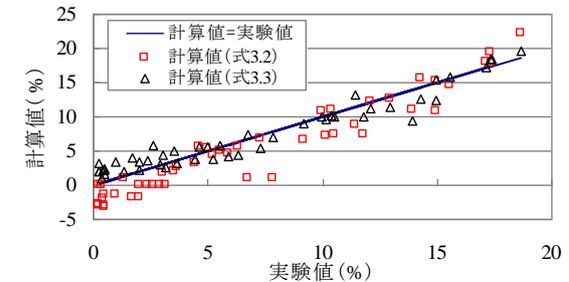


図 4 式 3.2, 3.3 による凍結線膨張率 ξ_1 の比較結果

展開としては、 ξ_3 ：熱流直角方向凍結線膨張率についても実験値に近い値が得られるよう解析を行っていくつもりである。

参考文献

- 1) 山本英夫, 上田保司, 伊豆田久雄: 飽和土の三軸凍結膨張に関する実験的研究, 日本雪氷学会学位論文, pp325-333, 1994
- 2) 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, 京都大学工学研究科学学位論文, pp5-40, 2007
- 3) 上田保司, 松岡啓次, 生瀬孝博: 三軸応力状態での凍結膨張率の凍結速度依存性, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp1187-1188, E-09, 2002