

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

北海道大学大学院工学院	学生員	○高橋 翔平
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江 俊仁
(株) 精研技術開発部	正会員	上田 保司

1. まえがき

現在、凍上による凍結膨張量の予測には予測精度の高い高志の式などに代表される一次元の体積の膨張量を求める評価式が用いられている。寒冷地における自然凍結では凍土は地表面から一次元的に凍上するため、既往の評価式でその発現特性を十分に考慮できる。しかしながら、凍結工法や凍土地帯での構造物の構築、大都市部の地下からの凍結問題に対しては、三次元的な凍結膨張量の予測、応力評価がより一層重要となってくる。そこで、本研究では既往の一次元の凍結膨張量評価式である高志の式を三次元に拡張し、上田らが行った三軸凍上実験との比較からその妥当性の検討を行うことを目的とする。

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結果によるもので、凍結中に脱水压密がほとんど生じない藤の森粘土を 1MPa で予圧密した後、実験中は拘束応力を深い地盤を想定し、0.05MPa 以上の応力を与えるよう 0.049～0.392MPa の範囲に保ち、凍結速度を 2mm/hr に制御し行ったものである。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面より 5, 15, 25, 35mm の 4ヶ所×2 半径方向の計 8ヶ所の半径をノギスで測定し、供試体の初期半径 r とその平均の変位量 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。このように、三軸凍上実験は 0.05MPa 以下の小さい拘束応力を含んでいることによる凍結膨張率の低減効果、供試体の熱流直角方向の凍結膨張変位の測定をノギスで行っていることが課題として挙げられる。

3. 凍上率の評価式

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予測精度の高い実験式が広く用いられている。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。

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

上述したように式 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 σ と U が大きいほど、凍上率が小さくなることを示している。

4. 三次元への拡張モデル

式 3.1 に示す高志の式は体積の膨張率の予測式である。寒冷地における自然凍結では凍土は地表面から一次元的に凍上するため、凍結膨張変位は熱流方向にのみ発生する。しかし 1. はじめに述べたように今後は発現特性を考慮した三次元的な凍結膨張率の評価が重要となってくる。実際に、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。そこで本研究では式 3.1 に以下の式 4.1, 4.2 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 と熱流直角方向の長さの変化率である ξ_3 を計算する。

$$\alpha_1 = \frac{\sigma_2 + \sigma_3 - \sigma_1 - 1/2 \cdot |\sigma_2 - \sigma_3|}{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3} \quad \text{式(4.1)}$$

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

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3} \right) \quad \text{式(4.2)}$$

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。

キーワード 高志の式、三軸凍上実験、凍上率、凍結線膨張率

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学研究院 TEL011-706-6176

5. 修正高志の式

式 3.1 に三軸凍上実験結果を用い，式 5.1 に示す最小二乗法による収束計算により土固有の定数 ξ_0 , σ_0 , U_0 を求めることになるが，解析の結果，凍結速度項の定数 U_0 が負に収束していくため正しい定数が得られなかった。

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

$$\begin{Bmatrix} \Delta \xi_0 \\ \Delta \sigma_0 \\ \Delta U_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0 \partial \sigma_0} & \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0 \partial U_0} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0 \partial \sigma_0} & \frac{\partial^2 S}{\partial \sigma_0^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial \sigma_0 \partial U_0} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial \xi_0 \partial U_0} & \frac{\partial^2 S}{\partial \sigma_0 \partial U_0} & \frac{\partial^2 S}{\partial U_0^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial S}{\partial \xi_0} \\ -\frac{\partial S}{\partial \sigma_0} \\ -\frac{\partial S}{\partial U_0} \end{Bmatrix} \quad \text{式(5.1)}$$

そのため，本研究では定数に関して線形化した式 5.2 に示す修正高志の式を提案する。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} + \frac{U_0}{U} \quad \text{式(5.2)}$$

この式 5.2 による計算値と三軸凍上実験の凍上率 ξ との比較を図 1 に示す。決定係数 R^2 は 0.788 であり，式 5.1 による計算値は実験値に良く一致した傾向にあるといえる。さらに，式 5.1 に式 4.1, 4.2 に示す補正係数を乗じ，凍結線膨張率 ξ_1 を算出し，三軸凍上実験結果と比較したグラフを図 2 に示す。式 4.1 による計算値の決定係数は 0.795，式 4.2 による計算値の決定係数は 0.926 と実験値に良く一致した傾向にあり，特に式 4.2 を用いれば決定係数 9 割以上という高い予測精度で凍結線膨張率を推定することができる。しかしながら， ξ_3 については実験値との誤差が大きくなっている。これは 2 章で示したように， ξ_3 の実験結果の測定をノギスにより行っていることから実験結果の信頼性が低いためである可能性が考えられる。

6. あとがき

本研究では，三軸凍上実験をもとに，三次元凍上率評価式として，式 3.1 に示す高志の式をそのままの式形で三次元に拡張することは出来ないことが検証された。そこで，式 5.2 に示す修正高志の式として高志の式を定数に関して線形となるよう修正し，さらに式 4.1, 式 4.2 に示す三次元拡張のための修正係数を提案し修正高志の式に適用したところ，凍上率 ξ ，熱流方向凍結線膨張率 ξ_1 については三軸凍上実験結果に近い解析結果を得

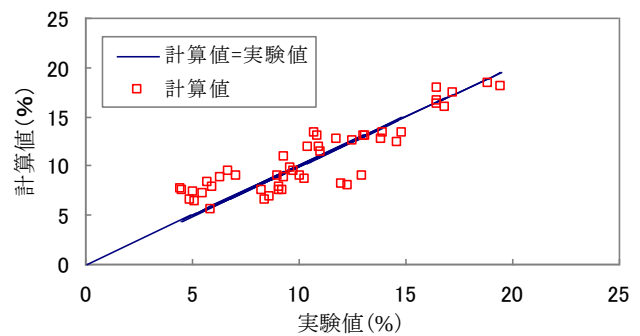


図 1 修正高志の式と三軸凍上実験との比較結果

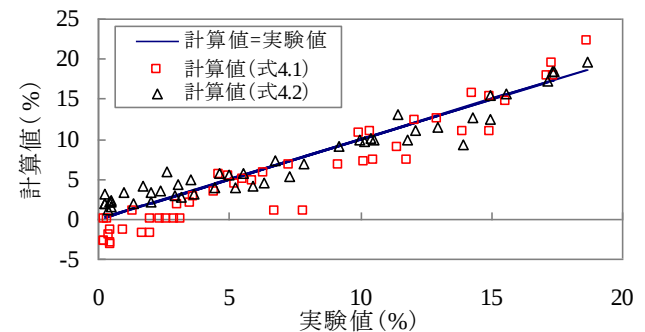


図 2 式 4.1, 4.2 による熱流方向凍結線膨張率 ξ_1 の比較

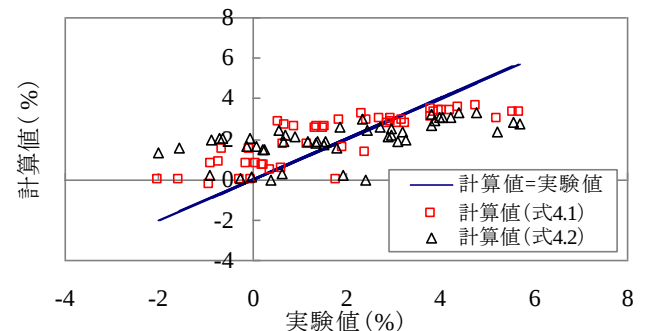


図 3 式 4.1, 4.2 による熱流直角方向凍結線膨張率 ξ_3 の比較

られた。今後の展開としては実験結果の信頼性が低いことも憂慮される熱流直角方向凍結線膨張率 ξ_3 についても同様に精度の高い解析結果が得られるよう研究を行っていく。

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，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，pp5-40，2007
- 3) 上田保司，松岡啓次，生頼孝博：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