# 未凍結土の弾性係数のひずみ依存性を考慮した凍結凍上解析

北海道大学大学院工学院	学生会員	○神谷	遼多
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江	俊仁
北海道大学大学院工学院	学生会員	鄭	好

# 1. はじめに

我が国は、地下埋設型 LNG タンクの建設をはじめ、 様々な工事への凍結工法の適用等を通じて、地盤の人 工凍結分野では世界でも先進的な役割を果たしてきた. 近年は、大都市の地下などでさらに高度で複雑な施工 技術が要求される上、福島第一原子力発電所における 遮水用凍上壁が注目されるなど、地盤の凍結をさらに 積極的に活用しようとする機運が高まっている.この ため、凍結凍上による周辺地盤と構造物との相互作用 に関する予測技術の重要性も一層増していると考える.

わが国では、凍上量と凍上力の評価には、高志の式 が広く用いられてきた.これによれば、凍上率は有効 拘束圧の関数として与えられ、有効拘束圧が高まれば 高まるほど、凍上率は低く評価される.もし、未凍結 土の弾性係数のひずみ依存性を考慮しなければ、凍上 による拘束圧力は凍上率に応じて増加するため、凍上 に伴って発生する有効拘束圧の増加が、却って凍上率 を低下させる傾向がある.一方、未凍結土の弾性係数 のひずみ依存性を考慮した場合、凍上による拘束圧力 はひずみレベルの上昇につれて低下する反面、凍上率 自体は上昇する結果となる.その結果、弾性係数のひ ずみ依存性が有効拘束圧と凍上率の増加や減少を複雑 に支配することとなり、凍結凍上評価に影響を与える こととなる.

そこで本研究では、未凍結土の弾性係数のひずみ依 存性を数値解析的に評価する手法を提案し、それが凍 結凍上評価に与える影響について検討を行った.

## 2. 解析手法

本研究では、熱流方向と凍結速度を評価する熱伝導 解析と、高志の式による凍上率を反映した凍結膨張解 析をカップリングした上で、弾性係数のひずみ依存性 については Duncan・Chang の変形係数式を採用した.

#### 2.1 熱伝導解析

熱伝導解析は式 2.1 に示す熱伝導方程式に基づき行う.

$$\left[C\right]\left\{\frac{\partial\theta}{\partial t}\right\} + \left[K_{H}\right]\left\{\theta\right\} = 0 \qquad (\not \exists 2.1)$$

[*C*]:熱容量マトリックス, [*K<sub>H</sub>*]:熱伝導マトリックス,  $\theta$ :節点温度( $\mathbb{C}$ ), *t*:時間(hr)である.凍結に伴う潜熱の影響は等価比熱法により評価し、時間ステップの計算にはクランク・ニコルソン法を適用した.

## 2.2 凍結膨張量の推定

凍上量の推定には、式 2.2 の高志の式を用いる.

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left( 1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \tag{\vec{x} 2.2}$$

*σ*: 凍結方向の拘束圧力, *U*: 凍結速度, ζ: 凍上率である. また, ζ<sub>0</sub>, σ<sub>0</sub>, *U*<sub>0</sub>は対象土の材料特性のみに依存する固有値である.

# 2.3 高志の式の二次元拡張

高志の式は熱流方向のみの一次元的な凍上進行を想 定している.しかし、パイプなどの構造物の凍上問題 を取り扱うとき、熱流方向に垂直な方向にも凍上が進 行する. そこで, 凍結の異方性パラメータ *B*を導入する. *B*は式 2.3 のように定義される.

$$\xi_h = \frac{1}{1+\beta}\xi \qquad \xi_v = \frac{\beta}{1+\beta}\xi \qquad (\not \exists 2.3)$$

#### 2.4 応力·凍上膨張解析

式 2.4 は凍上解析の基礎となる二次元力学平衡方程 式を表す.式 2.4 を有限要素式で離散化すると,式 2.5 が得られる.

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0\\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} + Y = 0 \end{cases}$$
(式 2.4)

$$[K_{s}]\{w\} - \{f_{t}\} = [f] \qquad (\exists 2.5)$$

[K<sub>s</sub>]:剛性マトリックス, {w}:節点変位, {f<sub>i</sub>}:温度 応力, {f}:外周拘束力である.

なお、温度応力の算出は次のように行う.まず、熱 伝導解析により凍結方向と凍結速度を求める.次に、 凍結方向の拘束応力 σ を熱膨張解析で求め、高志の式 から凍結膨張率を求める.この凍結膨張率と土の物性 より計算された値を式 2.5 に代入して温度応力を求め る.

## 2.5 土の弾性係数の変化の評価

本研究では、未凍結土の弾性係数変化を式 2.6 の Duncan・Changの変形係数式を用いることで考慮する.

$$E_t = \left(1 - R_f \frac{(1 - \sin \Phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c_u \times \cos \Phi + 2\sigma_3 \sin \Phi}\right)^2 E_i \qquad (\not \Xi 2.6)$$

 $E_i:$ 変形係数, $E_i:$ 初期弾性係数, $\Phi$ :内部摩擦角, $R_f:$ 破壊時応力と Konder の双曲線の近似値との比, $C_u:$ 非 圧密非排水試験により求めた見かけの粘着力である. また,凍結土の弾性係数は一定値を用いる.

#### 3. 二次元パイプ実験との検証解析

非線形モデルの妥当性を確認するため、凍上性の高 いシルト層に冷却パイプを埋設した室内凍上実験結果 との比較を行った.

## 3.1 実験および解析モデル

実験は、凍上性の高いシルト層に直径 75mm のパイ プを埋設し、パイプ内を流れる不凍液で地盤を凍結凍 上させるものである.解析モデルにおいては、その対 称性から実験模型の片側半分を解析対象とし、図 1 に 示 す境界条件を与えた.モデルの外形寸法は 500mm×250mm であり、解析時間も実験と同じく 120 時間とした.なお、 $\beta=0$ と仮定し、その他の主な物性値 は表 1 に示す通りである.

#### 3.2 解析結果と考察

フロストバルブの比較を図 2 に,パイプ上面から 45mm 地点の凍上量比較を図 3 に示す.これらの結果よ り,フロストバルブの形状も,また凍上量についても 概ね妥当に評価されているものと考える.特に凍上量

キーワード 凍上,応力ひずみ曲線,非線形,Duncan and Chang,高志の式,有限要素法 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院 TEL011-706-6177 の評価においては、従来の線形モデルがやや過大な評価を与えるのに対し、非線形モデルの実験値との整合性は極めて良いことがわかる.



<b>⊠</b> -1 ·	モデル概要図
表-1	物性値一覧

物性値名	粘土層(MZ kaolin)	埋設パイプ(アルミ)	砂層(豊浦標準砂)	
$E[N/m^2]$	2.8×10 <sup>8</sup>	7.0×10 <sup>10</sup>	2.8×10 <sup>8</sup>	
ν	0.2	0.33	0.2	
$ ho  [kg/m^3]$	1930	2700	1550	
C [J/(kgK)]	1005	913	1005	
k [J/(smK)]	1	2.56	1	
w	0.5	0	0.25	
<i>šo</i>	0.05	0	2.79×10 <sup>-2</sup>	
U <sub>o</sub> [m/s]	4.431×10 <sup>-7</sup>	0	0	
$\sigma_{O} [\text{N/m}^{2}]$	4563	0	0	





Time (hr)

非線形モデルの信頼性が確認されたところで、未凍 結土の弾性係数のひずみ依存性がどの程度凍結凍上評 価に影響するのかを調べるために、より現実に近いシ ンプルな例として埋設式ボックスカルバートを想定し、 構造物に作用する応力分布や地表面凍上量分布の比較 を行った.

## 4.1 解析モデル

150

Frost Heave (mm) 00 00

41

本モデルも左右対称性を考慮して片面を解析対象範囲とし,図4に示すモデルを設定した.解析時間は1 シーズンを想定して90日とし、モデル全体の初期温度 を5℃、カルバート内部および地表面温度は外気を想定 して正弦関数に従い0℃から-20℃になるようにした. 各物性値を表2に示す.

## 4.2 解析結果と考察

解析モデル右側面に作用する水平応力の比較を図 5 に,解析モデル底面に作用する鉛直応力の比較を図 6 に示す.どちらのグラフを見ても、非線形モデルの場 合の方が応力値は小さくなっており、従来の線形モデ ルでは、応力を過大評価していることになる.従って、 経済性の観点から、未凍結土の弾性係数のひずみ依存 性の影響は大きいと言える.また、応力の最大値の位 置についても違いがあることが分かる.応力を過大評 価しているということは、安全側に見込むことになる ので設計上問題ないように思われるが、応力の最大値 の位置が異なることもあり、未凍結土の弾性係数のひ ずみ依存性を考慮することは重要と考える.なお、紙 面の都合上凍上量分布の図は示さなかったが、線形モ デルよりも大きな凍上量が予想された非線形モデルは、 凍上量の予測においても小さな結果を与え、応力や変 形の評価に大きな影響を与えることが確認された.



図-6 モデル底面の鉛直応力の比較

## 5. まとめ

120

本研究では、未凍結土の弾性係数のひずみ依存性を 評価する手法を提案し、二次元室内試験との比較等を 通じてその有効性が検証された.また、実構造物への 適用を意識したサンプル解析では、応力分布や凍上量 分布への影響が顕著に表れ、ひずみ依存性を考慮した 解析手法の重要性が確認された.

## 参考文献

- 牧村美智代,蟹江俊仁,横井崇志:二次元練成凍上解析による 地中埋設構造物の挙動評価,土木学会年次技術講演会講演概要 集(CD-ROM)Vol.66,2011)
- Zheng Hao, Practical Evaluation for Interactive Behavior between Structure and Two-dimensional Frost Heave, Graduate School of Engineering Hokkaido University, Master's Thesis No.EG-M92, 2011
- 3) 木下誠一: 凍土の物理学, pp1-57, 森北出版, 1982