

# 応力ひずみ関係の非線形性がもたらす凍上圧力評価への影響について

Effect of nonlinear property of soil on evaluation of frost heave pressure

北海道大学工学部環境社会工学科 ○ 学生会員 神谷遼多 (Ryota Kamiya)  
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 蟹江俊仁 (Shunji Kanie)  
 北海道大学大学院工学院 学生会員 鄭好 (Hao Zheng)  
 北海道大学大学院工学院 学生会員 高橋翔平 (Shohei Takahashi)  
 北海道大学大学院工学院 学生会員 大村健祐 (Kensuke Omura)

## 1. はじめに

近年、災害時のリスクが少ない埋設型 LNG タンクや、北方圏における安全かつ環境影響が少ない埋設型 LNG パイプライン、福島第一原子力発電所における放射能汚染水削減のための凍上壁が注目をされている。寒冷地における地盤だけでなく、前述のような低温構造物の埋設では地盤を凍結させるので地盤の凍上が起こる。従って、凍上量及び、凍上による周辺地盤と構造物の相互作用の予測精度の向上が必要とされている。

これまでわが国では、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。この考え方を実用的な多次元モデルでの解析に適用し、地中構造物に作用する凍上圧力を評価することを考える。

もし、地盤の応力ひずみ関係が線形で与えられるとすれば、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、応力ひずみ関係に非線形性を考慮した場合、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、地盤の応力ひずみ関係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、地中構造物に作用する凍上圧力評価に影響を与えることとなる。

そこで本研究では、応力ひずみ関係の非線形性がどの程度凍上圧力評価に影響するのかを数値解析的に検討し、地中構造物に作用する凍上圧力評価における応力ひずみ関係式の重要性について検討することを目的とする。

## 2. 解析手法

本研究では、平面二次元内での熱伝導解析と、一次元の凍上予測式として一般的な高志の式を適用した凍結膨張解析、Duncan と Chang の変形係数式の連成解析を用いて、凍上挙動を評価する。

### 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。

$$[C] \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\} + [K_{H}] \{\theta\} = 0 \quad (2.1)$$

$[C]$ :熱容量マトリックス  $[K_{H}]$ :熱伝導マトリックス

$\{\theta\}$ :節点温度  $t$ :時間

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潜熱の考慮を等価比熱法により評価するため、陰解法であるクランク・ニコルソン法を用いた。

### 2.2 凍結膨張量の推定

凍上量の推定には、実験式である高志の式が広く使われている。式(2.2)はその式を表す。

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

$\xi$ :凍上率  $\sigma$ :凍結方向の拘束応力  $U$ :凍結速度  
 $\xi_0, \sigma_0, U_0$ :凍上定数

### 2.3 高志の式の拡張

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  $\beta$  を導入する。 $\beta$  は式 2.3 のように定義される。

$$\xi_h = \frac{1}{1 + \beta} \xi \quad \xi_v = \frac{\beta}{1 + \beta} \xi \quad (2.3)$$

$\xi$ :凍結膨張率  $\xi_h$ :熱流方向の凍結膨張率  
 $\xi_v$ :熱流方向に垂直方向の凍結膨張率

### 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。

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

$$[K_s] \{w\} - \{f_i\} = \{f\} \quad (2.5)$$

$[K_s]$ :剛性マトリックス  $\{w\}$ :節点変位

$\{f_i\}$ :温度応力  $\{f\}$ :外周拘束力

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  $\sigma$  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、土の弾性係数変化を式 2.6 の Duncan と Chang の変形係数式を用いることで考慮する<sup>1)</sup>。

$$E_t = \left( 1 - R_f \frac{(1 - \sin \Phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c_u \times \cos \Phi + 2\sigma_3 \sin \Phi} \right)^2 E_i \quad (2.6)$$

$E_t$ : 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 Kondner 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掛けの粘着力

2.6 サンプルモデル概要

応力ひずみ関係の非線形性がもたらす凍上圧力の評価への影響を調べるために、図-1 のサンプルモデルを想定し解析を行なった。計算条件及び物性値を表-1 に示す。

3.解析結果

温度分布を図-2 に、応力ひずみ関係に非線形性を考慮した場合の弾性係数の分布を図-3 に、底面中央における垂直応力の時間変化を図-4 に示す。温度分布と弾性係数分布は、計算期間の最後の時点のものである。

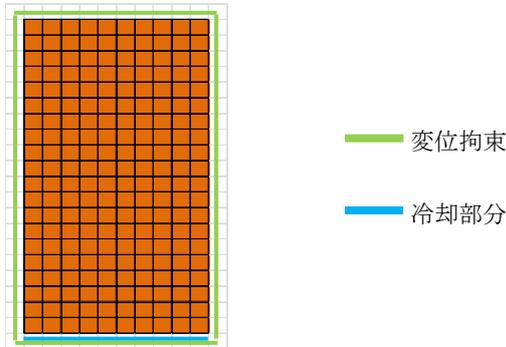


図-1 サンプルモデル図

表-1 計算条件及び物性値

要素数 [個]	200	$E$ [N/m <sup>2</sup> ]	$1.26 \times 10^8$
全体のスケール [cm×cm]	10×20	$\nu$	0.3
計算期間 [hr]	24	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1700
初期温度 [°C]	5	$C$ [J/(kgK)]	1300
冷却温度 [°C]	-10	$k$ [J/(smK)]	1.2
計算ステップの間隔 [s]	9	$w$	0.5
RMS	21.9	$\xi_0$	0.025
		$U_0$ [m/s]	$4.431 \times 10^{-7}$
		$\sigma_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	4563
		$\beta$	0, 0.5, 1
		$R_f$	1
		$C_u$ [N/m <sup>2</sup> ]	$6.0 \times 10^5$

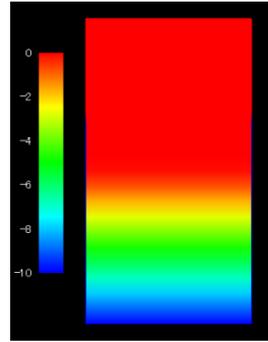


図-2 温度分布

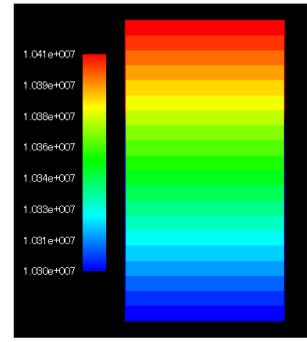


図-3 弾性係数分布

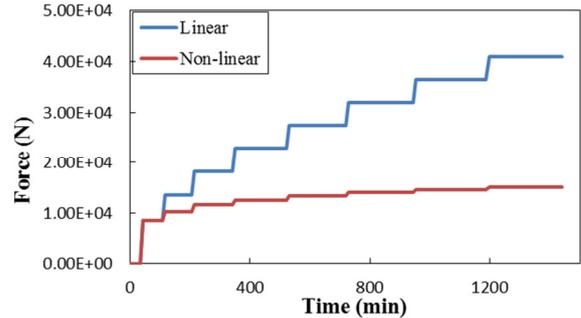


図-4 底面中央における垂直応力の時間変化

4.考察

モデルの底面から冷却しているため、底面側の土から凍結が起こる。従って、底面側の土では軸差応力が大きくなり、式(2.6)より弾性係数が小さくなる。その結果、弾性係数は図-3 の分布になったと考えられる。

図-4 の垂直応力時間変化をみると段階的に増加している。これは土の凍結が-0.5°Cで凍結すると考えているためである。また、応力ひずみ関係に非線形性を考慮した場合の方と応力ひずみ関係式が線形で与えられる場合とでは、応力ひずみ関係に非線形性を考慮した場合の方が小さく、時間の経過とともに大きな差が出ている。つまり、従来の地盤の応力ひずみ関係式が線形で与えられる条件では、応力が過大評価されていたことが分かった。

5.まとめ

本研究で応力ひずみ関係の非線形性がもたらす凍上圧力の評価への影響を数値解析によって明確に示すことができた。

本研究では応力ひずみ関係の非線形性がもたらす凍上圧力の評価への影響を明確に示すため、シンプルな解析モデルのもと評価を行ったが、今後はより実際的な環境を想定して、冷却温度変化や、地中構造物が埋設されているモデルを解析し、冷却構造物に作用する凍上圧力の軽減に役立てたい。

参考文献

1) 木下誠一：凍土の物理学, pp1-57, 森北出版, 1982