

二次元連成解析による埋設構造物の凍上挙動評価

The evaluation of frost heave behavior of buried structure based on two-dimensional coupling analysis

北海道大学工学部環境社会工学科	○学生会員	牧村 美智代 (Michiyo Makimura)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江 俊仁 (Syunzi Kanie)
北海道大学大学院工学研究科	学生会員	西 慎彦 (Makihiko Nishi)
北海道大学大学院工学院	学生会員	横井 崇志 (Takashi Yokoi)

1. はじめに

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。しかし、そのような地域に埋設された冷却ガスパイプラインには、凍上現象によるパイプの変形・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、凍土とパイプラインの相互作用を適切に評価する必要がある。特にパイプライン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。本研究では、既存の一次元凍上予測式を二次元拡張することで、地中に埋設した冷却ガスパイプラインの凍上挙動を二次元的に予測するとともに、室内実験の結果と比較し、解析の妥当性を検討することを目的とする。

2. 解析方法

構造物の凍上挙動手法が確立されていない背景には、凍結に伴う水の移動と凍結膨張量の定量評価が困難であることが挙げられる。本研究では、一次元の凍上予測式として広く用いられている高志の式を適用し、平面二次元内での熱伝導解析と凍結膨張解析をカップリングすることで凍結物の凍上挙動評価を試みた。

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いて行うこととした。

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

ここで、 $[C]$ ：熱容量マトリックス、 $[K_H]$ ：熱伝導マトリックス、 θ ：節点温度(°C)、 t ：時間(hr)を表す。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 凍結膨張ひずみ

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。

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

ここで、 σ ：凍結方向の拘束圧力、 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 2.2 は、一次元での凍上量を予測するものとして我が国で広く用いられており、 σ ：凍結方向の拘束圧力と U ：凍結速度が大きいほど、 ξ ：凍上率が小さくなることを示している。式 2.2 を二次元問題に拡張することにより、凍結膨張率を設定するものとする。

寒冷地における自然凍結では、凍土は地表面から 1 次元的に成長するため、凍結膨張変位は熱流方向のみに発生する。

これに対して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その直角方向にも発生する¹⁾。本研究では、式 2.2 における ξ ：凍結膨張率を二次元拡張した場合の異方性を表すパラメーター： β を設けることで、式 2.2 における異方性、 ξ_h ：熱流方向凍結膨張変位と ξ_v ：熱流方向直角変位を式 2.3 の形で表現する。

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

2.3 凍結膨張解析

凍結膨張解析にあたって基本となるのは、力学的平衡状態を表す式 2.4 である。式 2.4 を有限要素式で離散化すると、式 2.5 が得られる。

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

$$[K_s]\{w\} - \{f_t\} = \{f\} \quad (\text{式 2.5})$$

ここで、 $[K_s]$ ：剛性マトリックス、 $\{w\}$ ：節点変位、 $\{f_t\}$ ：温度応力、 $\{f\}$ ：外周拘束力を表す。なお、 $\{f_t\}$ ：温度応力の算出にあたり、まず熱伝導解析により凍結位置における凍結方向・凍結速度を求める。その後、凍結方向の拘束圧力 σ を熱膨張解析から求め、高志の式に基づいた適切な凍結膨張率を算定する。温度応力はこの凍結膨張率と土の弾性係数から計算されたものを式 2.5 に代入するものとする。

2.4 解析モデル

解析対象として 2007 年に日浅らが行った埋設式冷却ガスパイプラインの凍結実験模型²⁾を選定して有限要素法を用いた解析を行い、解析結果と実験結果を比較した。

日浅らは予備実験として地盤材料の代わりに対流が生じない水の再現材料として寒天を用いた予備実験を行っている。同実験はフロストバルブの成長の様子や模型土槽内における断熱性や熱伝導の等方性などの熱的二次元特性確認のために行われた。寒天を水とみなすと、 k ：熱伝導率や ρ ：密度などの熱伝導解析に使われるパラメーターとなる物性値が明確であるため、本研究では温度解析の妥当性を検証するための比較対象として用いることにした。

モデル化につき、左右対称の実験模型(図 1)の片面を解析対象範囲として取り上げ、図 2 に示す境界条件を与えた。解析モデルの左右対称切断面は断熱とし、パイプ内壁部分は-3.0°C (パイプ冷却温度)、モデルと外気との境界面には 2.5°C (室温)の温度境界条件を与えた。

2.5 数値計算条件

本解析を行う上で用いる各構成材料の条件を表 1 に示す。解析対象時間は実験と同様の 120(hr)、計算ステップの時間刻みは、クーラン数を考慮して 6(sec)とした。

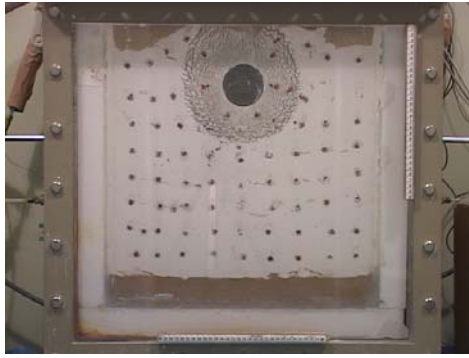


図 1 実験装置写真

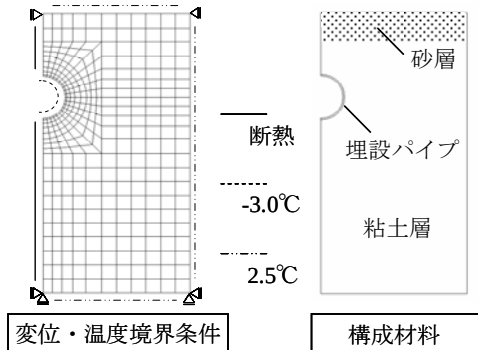


図 2 解析モデル概要

表 1 数値計算に用いた物性値

	粘土層 (MZカオリン)	埋設パイプ (アルミ)	砂層 (豊浦標準砂)
E [N/m ²]	2.80E+08	7.00E+10	2.80E+08
ν	0.200	0.330	0.200
ρ [kg/m ³]	1707	2700	1550
c [J/kg·K]	1010	913	1010
k [J/smK]	1.00	2.56*	1.00
w_c	0.400	0.000	0.250
ε_0	凍上/その場凍結 2.50E-02 / 6.32E-02	0.000	2.32E-02
σ_0 [N/m ²]	凍上/その場凍結 800 / 0.000	0.000	0.000
U_0 [m/s]	凍上/その場凍結 6.90E-08 / 0.000	0.000	0.000

※ 肉厚 3mm のパイプ内の熱伝導解析はモデル全体への影響が微小なため、クーラン数を越えた解の発散防止のため、本来の物性値の 1/100 を用いた。

3. 解析結果

3.1 寒天モデルと用いた予備解析

解析モデル(図2)の粘土層・砂層を水の物性値に置き換えた計算結果と、寒天を用いた実験結果を比較したグラフを図3に示す。図4に、予備解析結果をもとに作成した温度分布(図4左)と変位(図4右)を示す。

3.2 凍上解析

解析モデルに表1の物性値を代入して計算を行った。なお、実際に実験で使用した粘土材料の NSF 粘土の正確な物性値が不明であったため、本研究においては MZ カオリンの物性値³⁾で代用した。図5に、凍上解析結果をもとに作成した温度分布(図5左)と縦方向の変位(図5右)を示す。

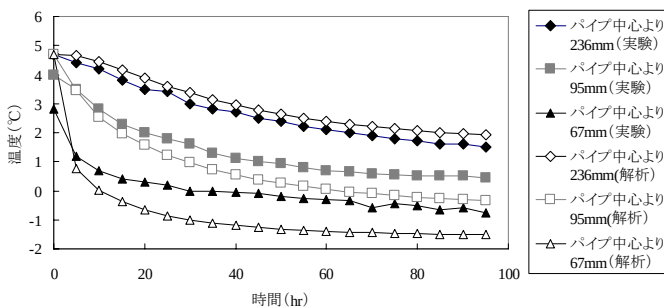


図 3 解析・寒天実験結果の温度変化の比較 (予備解析)

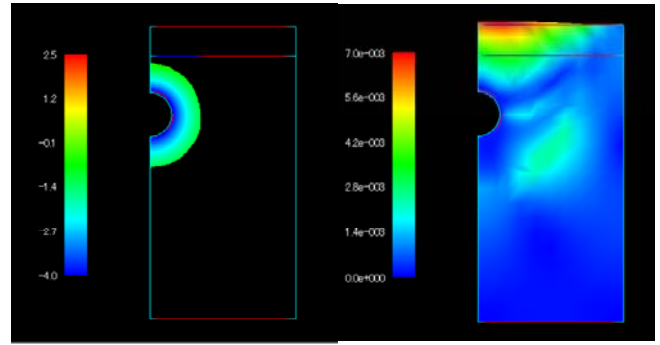


図 4 凍結範囲と縦方向変位の解析結果 (予備解析)

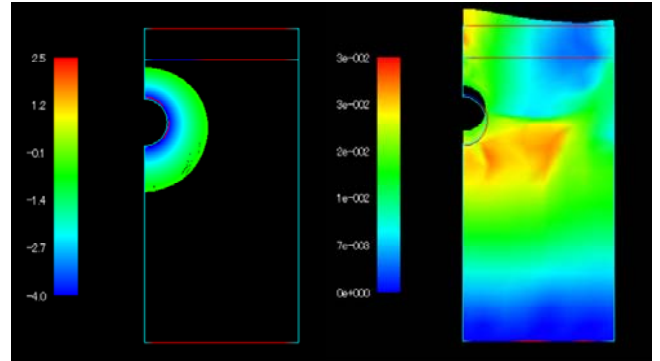


図 5 凍結範囲と縦方向変位の解析結果 (凍上解析)

4. 考察

4.1 熱伝導解析の妥当性について

図3より、温度の経時変化を比較すると、解析と実験値の値が非常に近くなることがわかる。これにより、本研究における熱伝導解析の妥当性が検証された。

解析結果は実験結果よりも若干温度が低い傾向にあるが、これは計算に用いた物性値が実験時とは微妙に異なることや、実験中の熱伝導のロスが存在が原因として考えられる。

4.2 凍結膨張解析の妥当性について

図4、図5に示した解析結果の縦方向変位を見ると、凍上を起こさない条件で計算した予備解析の結果(図4)は、縦方向の変位は純粋なその場凍結程度しかみられず、凍上を考慮したモデルの結果(図5)においては、実際の凍上時とよく似た挙動を示していることが確認できる。よって、凍結膨張解析の妥当性が検証されたと考えられる。

縦方向の変位は、温度と比較すると実験値との差が大きいですが、実験に用いた NSF の物性値を計算に使用したり、弾性係数の温度依存性を考慮したりすることで、より実験値に近い解析結果が得られるものと考えられる。

参考文献

- 1) 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, p6, 2007
- 2) 日浅崇平, 赤川敏, 蟹江俊仁: 永久凍土地帯における埋設式ガスパイプラインとフロストバルブの相互作用の実験的研究, 北海道大学土木工学科平成18年度修士論文, pp6-48, 2007
- 3) 横山正巨, 蟹江俊仁, 赤川敏: 熱伝導・凍結膨張カップリング解析による凍結土とパイプとの相互作用評価, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.65, A-46, 2009