

二次元凍上解析による地中埋設構造物の挙動評価

北海道大学大学院工学院 ○学生会員 牧村 美智代
 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 横井 崇志

1. はじめに

北方圏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、埋設型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

本研究では、一次元の凍上予測式として一般的な高志の式を適用し、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、構造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。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、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

2007 年に日浅らが行った埋設式冷却ガスパイプラインの実験模型を解析モデルとして選定した。モデル化につき、左右対称の実験模型の片面を解析対象範囲として取り上げ、図 1 に示す境界条件を与えた。

2.5 数値境界条件

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。解析にあたって、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。

キーワード 不連続永久凍土地帯、凍上、フロストバルブ、埋設型パイプライン、二次元凍上解析、高志の式
 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 TEL011-706-6177

3. 解析結果と考察

3.1 寒天モデルを用いた予備解析

日浅らは、地盤材料の代わりに対流を生じない水の再現材料として寒天を用い、フロストバルブ成長の様子や熱伝導の等方性などを確認する予備実験を行った。寒天を水とみなすと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に用いる。予備解析の結果と、寒天を用いた実験結果を比較したグラフを図2に示す。図2より、実験時の条件に近い解析条件を与えると、実験結果と解析結果の温度挙動も近くなることから、これにより、熱伝導解析の妥当性が確かめられた。

3.2 粘土モデルを用いた凍上解析

解析モデルに表1の物性値を代入して計算を行った解析結果と、実験結果を比較したグラフを図3に示す。なお、解析は(a)実験再現ケース、(b)非凍上性の物性値を与えたケース、(c)凍結速度を実験よりも大きくしたケースの3通り行った。(a)実験再現ケースの解析結果が、予想通り実験結果に最も近い挙動をとり、凍結膨張解析の妥当性が検証された。また、 β を強い異方性側に設定する方が凍結膨張の挙動が実験結果に近づき、実際の凍上現象は強い異方性であることが確かめられた。なお、現段階では冷却パイプと粘土間の熱伝達率ロスを無視しているため、熱伝導解析において実験結果よりも温度低下の傾きが大きくなる傾向にある。

4. 結論

本研究により、熱伝導解析・凍結膨張解析ともに実験時に近い条件を与えれば、二次元凍上解析の結果は実現象に沿った挙動をとることが検証された。今後は現在の解析手法に加え、材料ごとの熱伝達率の差異、凍結による弾性係数の増加、 β の最小主応力依存性などを考慮し、より実現象にあった凍上現象の再現を行うことが課題である。

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

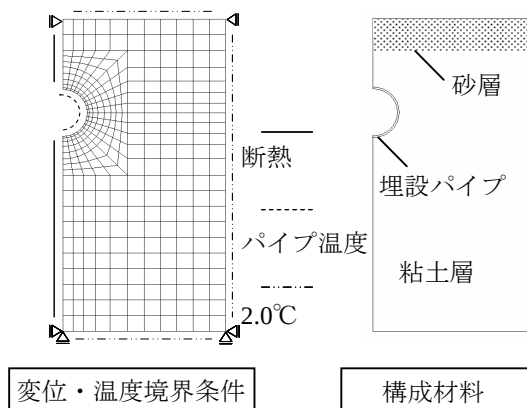


図1 解析モデル概要

表1 解析条件概要

	寒天層	粘土層	埋設パイプ	砂層
$E[N/m^2]$	2.80E+08	2.80E+08	7.00E+10	2.80E+08
ν	0.200	0.200	0.330	0.200
$\rho[kg/m^3]$	1000	1930	2700	1550
$c[J/kg \cdot K]$	4200	1010	913	1010
$k[J/smK]$	0.56	1.00	2.56※	1.00
wc	1.000	0.500	0.000	0.250
ξ_0	0.09	0.03	0.000	2.79E-02
$\sigma_0[N/m^2]$	0.00	800.00	0.000	0.000
$U_0[m/s]$	0.00	0.00	0.000	0.000

※パイプ部分は、解の発散防止のため本来の物性値の1/100を用いた。

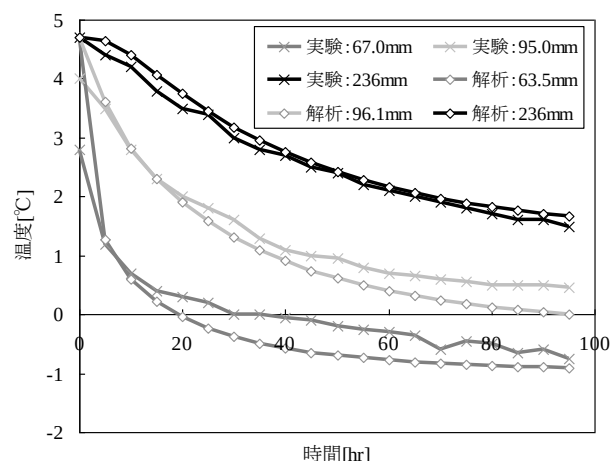


図2 寒天モデル解析結果(温度)

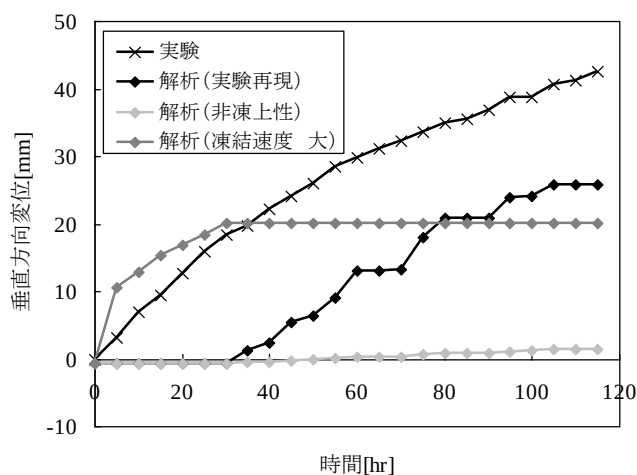


図3 粘土モデル解析結果(垂直変位)