

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応力評価

Stress interaction of freezing soils and pipes based on coupling analysis of heat conduction and frost heave

北海道大学大学院工学研究科	○学生員	横山 正臣 (Masaomi Yokoyama)
北海道大学大学院工学研究科	正員	蟹江 俊仁 (Shunji Kanie)
北海道大学大学院工学研究科	正員	佐藤 太裕 (Motohiro Sato)
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	三上 隆 (Takashi Mikami)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	岡本 玄 (Hikaru Okamoto)

1. はじめに

現在、天然ガスの安定的な供給を確保するため、パイプラインによる天然ガスネットワークの利用が望まれている。しかし、アラスカ、シベリア等の永久凍土と非永久凍土が混在する地域に埋設された冷却ガスパイプラインは、周辺地盤との凍上などの複雑な相互作用によって、予期せぬ沈下や上昇、破損等の被害が報告されている。このような問題を解決するために、凍上とパイプラインの間に作用する応力評価と予測技術の確立が求められている。

これまでの凍結モデル実験により、パイプ周辺にフロストバルブが生成されたときのパイプ内及びフロストバルブ内の応力分布が徐々に明らかになってきた。それに加えて、凍上・氷層と構造物が構造物に与える影響を把握する上で、凍上・氷層と構造物との凍着強度も重要であると考えられる。これは、フロストバルブ形成によるパイプラインの曲げ剛性やせん断抵抗性への寄与は、凍着が連続に保持され、密着していることが条件となるからである。この凍着強度は、凍上・氷層の温度、接触面の面圧、ひずみ速度のような因子に左右される。本研究では、これらの因子の中から接触面の面圧に焦点を当て、凍土の温度、剛性、接触面応力の関係を把握することを目的とする。

2. 解析方法

図-1のような条件で、外周をメンブレン等で拘束された1/4円形断面の解析モデルを考える。FEMで以下の2つの解析を行う。

2.1 熱伝導解析

$$[C] \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\} + [K] \{\theta\} = 0$$

ここで、 θ : 節点温度、 t : 時間(hr)を表す。熱伝導解析により、要素内温度及び凍結面が要素間境界に達するまでの時間を求める。また、潜熱の考慮は等価比熱法により評価する。等価比熱法は、水から氷への変化する際の潜熱を、見かけの熱容量の増加により評価するものであり、その概念図を図-2に示す。図中の網掛け部分の面積が水の単位質量当りの潜熱に等しくなるよう、液相限界と固相限界の間の熱容量を高めている。FEMでは、液相限界と固相限界の間に $\theta(t, i)$ が存在する際、次のステップ $\theta(t+1, i)$ 計算するには、熱容量マトリックスの i 行の値で用いている熱容量に水の潜熱分の熱量を足さなければならない。

2.2 凍結膨張解析

$$[K][w] - \{f_t\} = \{f\}$$

w : 節点変位、 f_t : 凍結膨張により生じる力、 f :

外力を表す。

土の弾性係数の評価は、熱伝導解析で求められた要素内温度から求める。温度が $\theta = -0.5^\circ\text{C}$ と、 $\theta < -0.5^\circ\text{C}$ のときの弾性係数を500(Mpa)、 $\theta = -10^\circ\text{C}$ で1000(Mpa)と与え、線形で表現したものを使用する。弾性係数と温度の関係を図-3に示す。

f_t の起因となる凍結ひずみ ϵ_t は、モデルの土中に含まれる水の体積膨張量を全体の体積膨張量で除し、2等分したものを与える。また、 f は変位に比例する拘束力を表す。

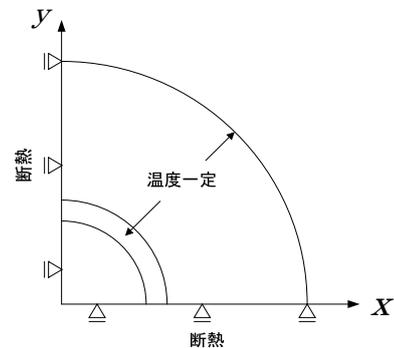


図-1 解析モデル

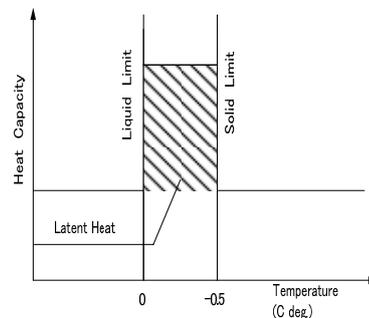


図-2 等価比熱法に潜熱の評価

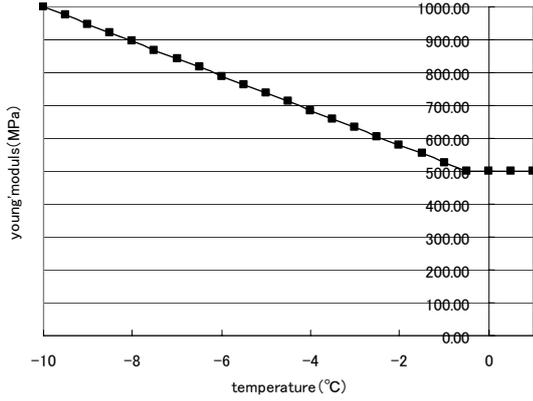


図-2 等価比熱法に潜熱の評価

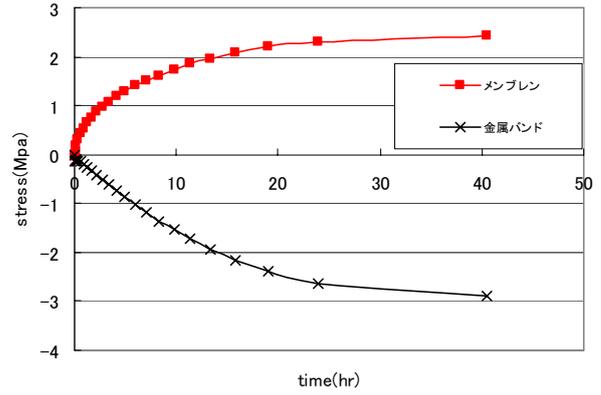


図-6 半径方向応力の時間変化

3. 数値計算例

本解析を行う上で一定にする条件を表-1に示す。

表-1 一定条件

凍結膨張ひずみ算出条件			
土粒子比重	2.64g/cm ³	飽和度	100%
含水比	50%		
熱伝導解析条件			
土の熱伝導率	0.86kcal/mhr°C	水の潜熱	80kcal/kg
土の比熱	0.24kcal/mhr°C		
土の湿潤密度	1707kg/m ³	土中の水単位体積重量	569kg/m ³
パイプ内温度	-10°C	外気温	1°C
パイプ内半径(外側)	25mm	土の半径	100mm
パイプ内半径(内側)	20mm		
弾性解析条件			
土のポアソン比	0.2	パイプのポアソン比	0.3

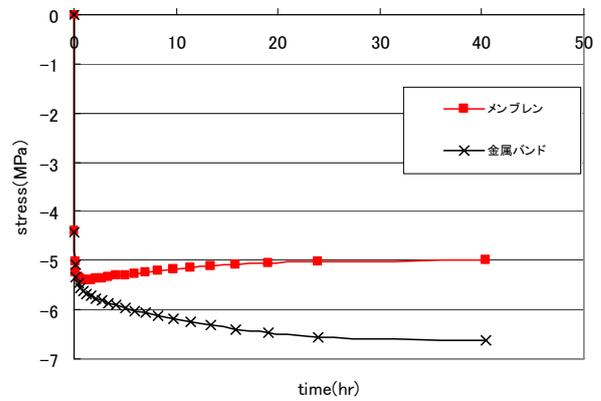
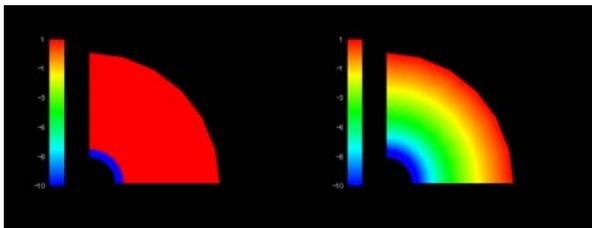


図-7 円周方向応力の時間変化

モデルの外周面における膨張に対する拘束性能は、フロストバルブとパイプとの相互作用応力に影響を与える重要な因子であり、強弱二種類の拘束条件を想定することとした。各々の条件は以下のとおりである。

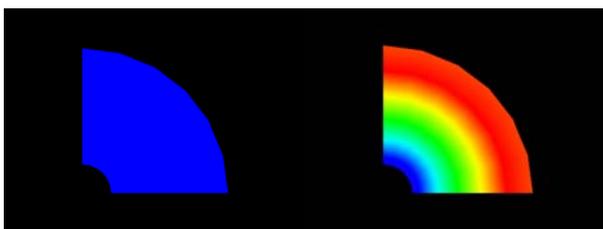
メンブレンによる外周拘束(弱) : 100Pa

金属バンドによる外周拘束(強) : 210Gpa



0 時間後 40 時間後

図-4 温度変化の様子



0 時間後 40 時間後

図-5 変位の様子

4. 考察

パイプと凍土との凍着強度には、半径方向の直応力が大きな影響を与える。図-6 からわかるように、外周をメンブレンで拘束した場合は、両者の相互応力が引っ張りとなるのに対し、金属バンドで拘束した場合には、圧縮応力となるため、より高い凍着強度が期待できることがわかる。

また、凍土弾性係数の温度依存性を考慮することにより、パイプと凍土との相互作用応力の時間的変化がより的確に評価することができ、冷却ガスパイプラインの凍上特性の評価に貢献できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 蟹江俊仁, 松村正士, 竺原宗吾, 西尾淳, 赤川敏 : 軸対称凍上モデルによるフロストバルブ生成時の応力評価, 土木学会北海道支部論報告集, vol.63C-3,2007