

軸対称凍結モデルによるフロストバルブとパイプラインの応力評価

Stress evaluation in frost bulb and pipeline with an axis-symmetric freezing experiment

北海道大学大学院工学研究科○学生員 西尾 淳 (Jun Nishio)
 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 赤川 敏 (Satoshi Akagawa)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 山下 俊彦 (Toshihiko Yamashita)

1. はじめに

アラスカ、シベリアなどの北方圏域に広く分布している天然ガスは、クリーンなエネルギー源であり、また、来たる燃料電池時代への有効な橋渡しとして今後更なる需要が見込まれる。その安定的な配給を確保するためには天然ガスネットワークの利用が望まれるが、凍土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、破損などの被害が報告されている。このような問題に対しては、凍土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期待される。

本研究は、これまで研究されることの少なかったパイプとフロストバルブの力学的相互作用を直接評価することを目的とする。なお、凍上率の評価には、一次元の凍上試験に基づいて提案された実用的評価式である高志の式を用いることとするが、本実験で用いる擬似一次元の軸対称凍結モデルを用いて、その多次元化問題への適用性についても確認することとする。

2. 軸対称凍結モデル実験

軸対称凍結モデル実験とは、本来三次元であるパイプとフロストバルブとの間の力学的作用を、簡単な擬似一次元として扱えるようにしたものである。すなわち、鉛直方向に立てたモデルパイプの周辺に、凍上性の高い試料で円筒形供試体を作成し、パイプ内部に冷却水を循環させることにより、同心円状のフロストバルブを生成させるものである。実験装置の概要を写真-1に示す。

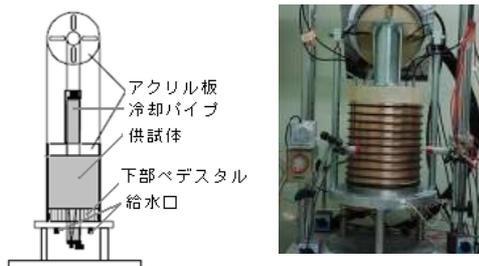


写真-1 軸対称凍結モデル実験

表-1 試料の実験条件

材料	MZ カオリン	圧密荷重	80kPa
土粒子比重	2.64g/cm ³	圧密時間	170hr(標準)
含水比(試料作成時)	70.18%	含水比(圧密後)	49.78%

凍結実験では、パイプ内に温度制御された不凍水を流し、供試体下部からの水の供給を自由にした状態で、フロストバルブを形成させる。実験中は、フロストバルブの成長に伴うパイプのひずみ、供試体の膨張量、水の供給量、不凍水温度などを経時的に計測するものとする。また、供試体内部には温度計を数箇所配置し、内部の温度分布も計測した。なお、供試体上部をアクリルキャップで拘束することで、パイプ鉛直軸方向の膨張を抑えながら、フロストバルブの成長を鉛直上方より観察した。

3. 内部応力の推定方法

供試体内部応力ならびにフロストバルブとパイプとの相互作用応力を直接計測することは困難であるため、パイプに作用するひずみや供試体外周の変位・変形状態から、解析的手法を併用して推測することとした。解析には、応力やひずみに重ね合わせの原理が適用できるなど、取り扱いが簡単な弾性理論を用いることとし、軸方向の変位を上部アクリルキャップで拘束していることから、平面ひずみ状態を仮定した。軸対称問題の半径方向の力学的平衡方程式は次式となる。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \quad (1)$$

ここで σ_r 、 σ_θ は、中心位置からの距離 r における半径方向ならびに周方向の応力度である。内径 a 、外径 b とし、その位置での変位量を u_a および u_b 、それぞれの位置での半径方向応力を σ_a および σ_b 、凍結膨張ひずみを ε として整理すると、式(2)になる。式(2)は、半径方向の距離 r に沿って離散化した時の、隣り合う二点における半径方向応力と半径方向変位の関係式である。

$$\begin{Bmatrix} -\sigma_r(a) \\ \sigma_r(b) \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} - \alpha \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix} \varepsilon_t \quad (2)$$

ただし、 $[K]$ は剛性マトリックス、 α は定数である。

Keywords : 天然ガス, パイプライン, 凍上, フロストバルブ, 高志の式, 解析

〒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科 沿岸海洋工学研究室 TEL : 011-706-6185

式(2)の右辺第二項は凍結膨張が発生した際の膨張圧力であり、未凍結部分には適用しないものとする。計算にあたっては、パイプも含めた供試体を半径方向に離散化して式(2)を適用し、パイプ内部の圧力(冷却液の圧力)と外周面での圧力を境界条件とした。また凍結膨張ひずみは、式(3)に示される高志の式から得られる凍上率を用いて設定した。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \quad (3)$$

ξ : 凍上率, σ : 拘束圧力 (kPa), U : 凍結速度 (mm/hr)

この式によれば、時々刻々と変化する凍上率に応力解析から求めた凍結面での拘束圧 σ と凍結速度 U をいれることで凍上率が評価できる。なお、凍結速度は1mm/hr程度になるように冷却水温度を調整する。

4. 実験結果とその評価

図-1には空間方向の温度分布の時間的変化を示す。図中には、実測値(時間断面あたり6点)と、実験開始時の温度分布を初期条件としてその後の温度分布を追った熱伝導解析による解析結果もあわせて示してある。図から明らかのように、初期条件を適切に与えることで、その後の内部の温度変化が適切に追えていることがわかる。この解析結果から、任意時刻における凍結面の進行速度を算出することとした。図-2は、凍結膨張による半径方向クラックが発生することにより、弾性体としての仮定が適用できなくなる直前(凍結開始後23時間後)の応力分布を示している。この図より、周方向応力度は、凍結面より内側で圧縮、外側で引張りとなっており、直感的予想と一致している。なお、凍結面が当該地点を通過する際に発生する一時的な引張力は、凍結膨張を与えたときの凍結部分と未凍土部分との剛性差に起因するものと思われ、弾性解析手法の問題点と考えられる。また、フロストバルブとパイプとの、半径方向の相互作用応力を図-3に示した。式(2)に基づく応力推定結果も合わせて示しているが、値には若干差異が見られるものの、その傾向については概ね再現されていると考える。なお、これらの計算に用いた計算条件は、表-2に示す通りである。

表-2 計算条件

冷却パイプ外径	50 mm	冷却パイプ弾性係数	210 GPa
供試体外径	200 mm	冷却パイプポアソン比	0.3
供試体高さ	200 mm	供試体弾性係数(凍結前)	500 MPa
凍結速度	1mm/hr.	(凍結後)	5000MPa
メンブリばね値	0.1 N/mm	供試体ポアソン比	0.2

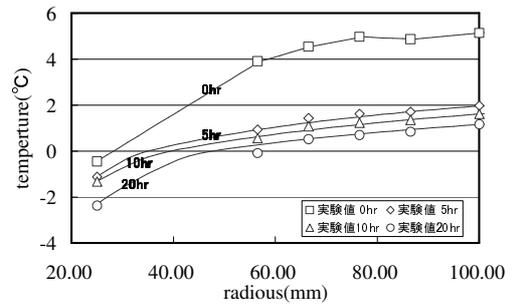


図-1 半径方向の実験値、解析値の温度分布

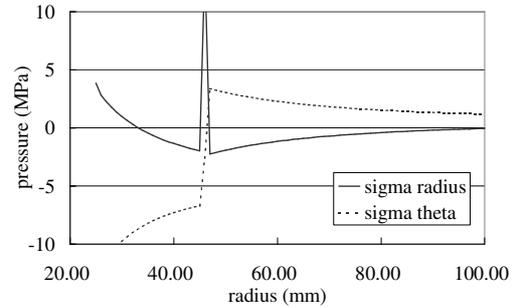


図-2 半径方向の応力度分布

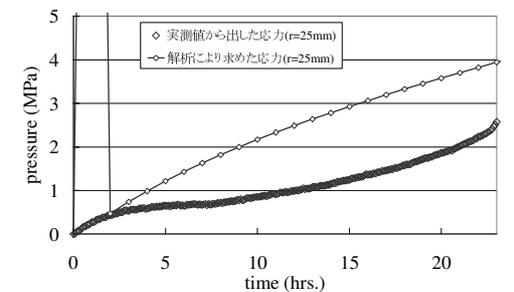


図-3 パイプ外径に作用する応力度の時間的変化

5. まとめ

本研究により、フロストバルブとパイプとの相互作用応力の大きさとその時間的変化が概ね評価できたと考える。しかし、本解析は弾性理論に基づく基礎的な解析であり、適用できる範囲に制限がある。また、フロストバルブの弾性係数の設定に計算結果が大きく依存することが判明しており、今後さらに実験結果との比較を重ね、その妥当性と適用性を向上させる必要があると考える。

参考文献

- 1) 高志勤, 益田稔, 山本英夫 : 土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度, 有効応力の影響に関する研究, 日本雪氷学会誌「雪氷」, Vol.36-2, pp.1-20, 1974.
- 2) 竺原宗吾, 蟹江俊仁, 西尾淳, 赤川敏 : 軸対称凍結のための凍上試験装置の開発, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.63,C-2, 2007
- 3) 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文報告集, Vol.63,C-3, 2007