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

Stress evaluation in frost bulb formed by an axis-symmetric freezing experiment

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	学生員	松村	正士 (Masashi Matsumura)
北海道大学工学部土木工学科	学生員	竺原	宗吾 (Sogo Jikuhara)
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	赤川	敏 (Satoshi Akagawa)

1. はじめに

クリーンエネルギーとして更なる需要が見込まれる天 然ガスは、アラスカやシベリアなどの北方圏域に集中し て存賦しており、安定的な供給を確保するためには、こ れら生産地と消費地とを結ぶ天然ガスネットワークの構 築が期待される.しかし、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、地表部 付近の地盤(活動層)の凍結融解作用や冷却天然ガスに よるパイプラインからの冷却作用などにより、周辺地盤 との複雑な相互作用が発生し、予期せぬ沈下や上昇によ る被害が生じている^{1),2)}.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 必要があり、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急務である.

これまでにも,非永久凍土地盤中に埋設された冷却ガ スパイプラインの挙動に関する研究はなされてきたが, パイプとフロストバルプの力学的相互作用を直接評価し ようとするものはほとんど見当たらない.その理由とし て,このような現象の実験的再現が困難であることと, 計測自体が難しいことが挙げられる.本研究は,冷却ガ スパイプライン周辺に生成されるフロストバルプの成長 に伴い,どのような荷重がパイプラインに作用し,フロ ストバルブ内でどのような応力分布が発生するのかを知 ることを目的とし,並行して行われる軸対称凍結モデル による実験結果の評価に資するものである.

2. 軸対称凍結モデル実験

軸対称凍結モデル実験は,パイプラインに見立てたモ デルパイプの周辺に,凍上性の高い試料による円筒形の 供試体を作成し,パイプ内部に冷却液を循環させること により,同心円状のフロストバルプを生成させるもので ある.これにより,内側から順次凍結した地盤が凍上作 用により膨張し,内側のパイプならびに外側のメンブレ ンに圧力を作用させることとなる.実験装置のイメージ 図を図-1に示す.

凍結実験にあたっては,供試体下部からの水の供給を 自由にさせることとし,フロストバルプ生成に伴うパイ プのひずみ,および供試体の膨張量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配置すると ともに,供試体上面をアクリルキャップで抑えることに より,パイプ軸方向の膨張を抑えながらフロストバルプ の成長の様子を観察する.

本解析は,計測されたパイプのひずみや供試体の膨張 量を検証するとともに,直接計測することが難しいフロ ストバルブ内の応力度分布を,限られた計測結果から推 測するために行うものである.

3. 解析方法

凍結凍上に伴う膨張現象は,多くのパラメータによる 相互作用の結果であり,きわめて複雑なものである.本 解析の目的は,凍結・凍上現象自体の細緻なシミュレー ションを行うことではなく,軸対称凍結モデル実験の評 価と検証を目的としている.このため,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 弾性理論を適用することとした.取り扱うモデルは軸対 称問題であり,凍結時にはパイプ軸方向の変位を拘束す ることから,円筒座標系に従った軸対称一次元平面ひず み問題を仮定した.

軸対称問題のため, θ方向に沿った応力の変化がない こと,ならびに体積力が作用しないことから,半径方向 の力学的平衡方程式は次式となる.

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

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.

一方,平面ひずみ状態における応力・ひずみ関係式は, 凍結による膨張ひずみ $_{\mathcal{E}_i}$ も含めて考慮すると,式(2)のようになる.

$$\begin{cases} \mathcal{E}_r \\ \mathcal{E}_\theta \end{cases} = \frac{1+\nu}{E} \begin{bmatrix} (1-\nu) & -\nu \\ -\nu & (1-\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{bmatrix} + \begin{cases} \mathcal{E}_t \\ \mathcal{E}_t \end{cases}$$
(2)

ここで, \mathcal{E}_r および \mathcal{E}_{θ} は半径方向ならびに周方向のひずみ,またEおよびvは弾性係数とポアソン比である. ひずみは変位を用いて次のように表される.

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_{\theta} = \frac{u}{r}$$
 (3)

式(2)および(3)を式(1)に代入することにより式(4)が 求められる.



図-1 軸対称凍結モデル実験装置イメージ図

変位 *u* は上式を二回積分することにより,二つの未定 係数を含む式(5)で表される.

$$u = \frac{1}{2}C_1 r + C_2 \frac{1}{r}$$
(5)

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 と すると,両側での境界条件から未定係数が決定されるこ とになる.式(6)は,半径方向の距離rに沿って離散化し た時の,隣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.

$$\begin{cases} -\sigma_r(a) \\ \sigma_r(b) \end{cases} = [K] \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} - \alpha \begin{cases} -(1-2\nu) \\ (1-2\nu) \end{cases} \mathcal{E}_t$$
 (6)

ただし,

$$\begin{bmatrix} K \end{bmatrix} = \alpha \frac{1}{a^2 - b^2} \begin{bmatrix} -a - (1 - 2\nu)b^2 / a & 2(1 - \nu)b \\ 2(1 - \nu)a & -b - (1 - 2\nu)a^2 / b \end{bmatrix}$$
$$\alpha = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

式(6)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 当たっては,パイプも含めた供試体を半径方向に離散化 して式(6)を適用し,パイプ内部の圧力(冷却液の圧力) と外周面のメンブレンからの圧力を境界条件として,ま た膨張部分には等価な膨張応力を入力して計算を行った.

4. 解析結果

凍上量は,凍結面位置における拘束圧力や凍結面の進 行速度などに依存する³⁾ため,実験結果との比較を行う ためには,計測結果に基づいて適切なパラメータを設定 する必要がある.ここでは実験の予備解析として行った 解析結果を示し,変位ならびに応力度の時間的,空間的 変化の様子を見てみる.実際の実験においては,凍結速 度が 1mm/hr.程度になるよう冷却パイプ内の温度を時間 的に変化させる予定であり,ここでは凍結面の進行速度 と側方拘束圧力は一定と仮定した.その他の計算条件は 表-1 に示すとおりである.

図-2 には凍結開始 50 時間後の圧力分布を,図-3 には 変位の時間的変化を示した.また図-4 は半径方向応力の 時間的変化を示したものである.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 を与えた時の凍結部分と未凍結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.

表-1 計算条件					
冷却パイプ	25 mm	冷却パイプ	210 GPa		
半径(外側)	25 1111	弾性係数	210 0Fa		
供 試 体 半 径	100 mm	冷却パイプ	0.3		
(外側)		ポアソン比			
供封体宣文	200 mm	供試体弾性係数	FOO MDo		
供試件同C	200 11111	(凍結前)	SUU MFa		
凍結速度	1mm/hr.	(凍結後)	1000MPa		
メンブレン	0.1. N/mm	供試体	0.0		
ばね値	U.I N/IIIII	ポアソン比	0.2		



図-4 半径方向応力度の時間的変化

5. 考察

図-2 からわかるように,半径方向応力は凍結面が通過 する部分を除いて圧縮となっており,凍結面位置よりも 内側の方が高い値を示している.一方周方向応力度は, 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.また,変位は凍結面が通過す るまでに大部分が発生することがわかる.一方,応力度 の時間的変化を見ると(図-4),凍結面通過後(一時的 な引張力の直後)に最大値を記録していることがわかる.

本解析は弾性理論に基づく基礎的な解析であり,膨張 による変形とひずみが大きくなった場合には,弾性体と しての仮定に問題が発生する.また,凍結による膨張の 異方性や側方拘束圧の変化の考慮など,更なる改良が期 待される.今後実験結果と比較しながら,適宜修正を加 え,多次元凍上問題への適用性を向上させる必要がある と考える.

参考文献

- 1) York, G. :"Russians are losers in Arctic oil gamble", pp.A1-A12, Vol.9, The Globe and Mail, Toronto, 1994.
- Williams, P. J. :" Pipelines & Permafrost", Science in a Cold Climate, Carleton University Press Inc. pp.62-77, 1986.
- 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.