

## 軸対称凍結のための凍上試験装置の開発

Development of an experimental device for axis-symmetric frost heaving

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	正員	蟹江 俊仁	(Shunji Kanie)
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

極地寒冷地に広く分布するガス田より採取される天然ガス資源は、いまや石油にとって代わる極めて重要なエネルギー源である。その天然ガスを広く世界中に供給するには輸送コストや安全性の面からもパイプラインの利用が有効であり、特に極地寒冷地にある採取場から輸送基地までの供給手段としてはパイプラインの存在が極めて重要となる。その際、パイプラインが永久凍土地帯と非永久凍土地帯が混在する地域にも埋設される。非永久凍土地帯では冷却天然ガスのためにパイプラインの周りにフロストバルブが発生・成長すること、地盤が凍結融解を繰り返すことからパイプラインを破損させる被害が報告されている。

しかし、これまでの研究では、凍上メカニズム自体に関わる研究成果の延長線上で構造物との相互作用を取り扱ったものが多く、凍結中の地盤と構造物との相互作用について直接実験的な研究を行ったものは限られている。わが国においても、地下埋設型の LNG タンクの設計等において、タンク周辺地盤の凍結進行にしたがって変化する凍上土圧の評価が必要となり、高志の式が準用されてきたものの、工事現場などでの工事管理に用いられることが多く、設計手法として確立されているとはいえない。本研究は、凍上試験方法として地盤工学会規準にも規定されている高志の式の実用性と簡易性に着目し、パイプと凍土との相互作用を実験的に観測するとともに、設計法の提案を念頭に、その適用性についても考察を加えようとするものである。

### 2. 実験の目的と装置に求められる仕様

本実験の目的は、以下の二つに大別される。

- ・ フロストバルブ成長に伴う力学的相互作用の観測
- ・ 高志の式の多次元問題への適用性の検証

まず、非永久凍土地盤中に埋設された冷却ガスパイプラインが、その周辺に形成されるフロストバルブによって、どのような力学的作用を受けるのかを観測することである。これまで、凍上作用を受ける冷却ガスパイプラインの挙動に関する研究はさまざまな方面からなされてきたが、パイプに作用する圧力を直接計測した例はほとんどない。また、実際の設計の段階を考えると、パイプとフロストバルブとの相互作用の評価と予測が極めて重要であり、従来提案されてきた高志の式や SP (Segregation Potential) 理論の多次元問題への適用性などが必要となっ

てくる。本実験の二つ目の目的は、本来一次元の凍上実験に基づいて提案された高志の式の多次元問題への適用性を検証することにある。高志の式は、下に示す式(1)で表される。

$$\xi = \xi_0 + \frac{100\sigma_0}{\sigma} \left( 1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \quad (1)$$

$\xi$  : 凍上率(%),  $\sigma$  : 拘束圧力 (kPa)

$U$  : 凍結速度 (mm/hr.)

この高志の式は、3つのパラメータがあれば、凍結速度と拘束圧力から凍上率が計算できる。それらの値は土それぞれが固有に持つものであり、現場に応じた凍上率を定量的に把握できる実用的な式である。しかし、熱流方向が限られており一次元問題への適用を意図して提案されたものである。本実験で採用されている軸対称凍結は、擬似一次元問題といえるものであるが、多次元問題への適用性を論じる上での導入にあたるものと考えている。

こうしたことから、実験装置には次のような仕様が要求される。

- 純粋な軸対称平面内凍上の発生と、同心円状のフロストバルブを形成させ、擬似一次元問題として扱えるようにすること
- フロストバルブ成長中の内部応力の計測あるいは予測ができるような計測システムを有すること
- フロストバルブの成長の様子が観察できること

### 3. 実験手順と計測項目

このような考え方に基づいて考案されたのが、図-1に示す凍結実験装置である。

擬似一次元空間をつくり出すため、今回の実験では地中に埋設されているパイプライン及び周辺地盤を円筒形に切り出したものを模して、切断面が下になるように立てた図-1のようなものを供試体として考えた。このようにすることで、供試体内部の一定の高さの平面内では、鉛直土圧が一定となり、同心円状のフロストバルブの形成が期待できると考えた。

実験手順としては、供試体を作成後、上部から荷重を作用させて圧密をし、圧密沈下の収束を確認してから凍結実験を開始する。凍結実験中の水の補給に関しては、ペDESTAL下部から切断面に対して一様に供給できるよう給水口を設けた。凍結実験時のイメージ図を図-2に示す。次に各計測項目について概説する。

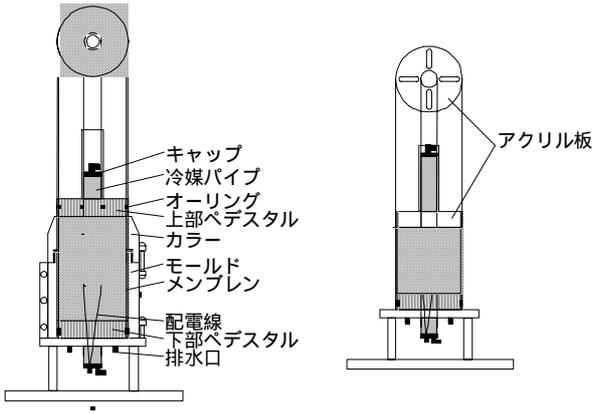


図-1 試験装置（圧密時） 図-2 試験装置（凍結時）



写真-1 試験装置外観

### 3.1 パイプに作用する周方向応力と変位

前述した拘束圧力はパイプ内に貼り付けてあるひずみゲージからパイプにかかる拘束圧力を計測する。特に鉛直方向と水平方向の2方向のひずみの計測が可能なくずみゲージを同一円周上に4箇所貼り付けた。これにより、主応力方向が明らかになる。

### 3.2 ワイヤゲージによる供試体全体の周方向の変位

ワイヤゲージによる供試体全体の周方向の変位量と、事前に計測したメンブレンの弾性係数を用いることで、メンブレンの変位量と供試体に作用する外圧が計算できる。

### 3.3 温度計による供試体内部の温度分布

供試体高さのほぼ中央付近に温度計を設置する。温度計は内径から外径にむけて等間隔に数箇所差込み、計測開始時間からの温度分布を計測し、凍結面の形状と進行速度の確認を行う。

### 3.4 フロストバルブ形成の観測

断熱効果がある素材としてアクリルを選び、上部からフロストバルブの成長の様子を観測するとともに、温度観測の結果推定されるフロストバルブの形状と比較できるようにした。

### 3.5 凍結中の軸方向圧力

供試体中のフロストバルブの成長に伴い、鉛直方向への成長を防ぐため、ロードセルを設置し、鉛直方向への成長を抑制しながら載荷重量を計測するものとする。

なお、フロストバルブがパイプに与える圧力や、フロストバルブ内の圧力分布については、計測されたパイプ圧力やメンブレンによる圧力から、数値解析等を併用して推定することとした。

## 4. 実験条件

実験供試体には、MZ カオリンを採用した。MZ カオリンは、凍上しやすい物質の上、含水比の制御により安定的な性質が確保できるためである。供試体の条件は次の表-1の通りである。

表-1 資料の実験条件

材 料	MZ カオリン
土粒子比重	2.64g/cm <sup>3</sup>
含水比	70.18% (試料作成時)
圧密荷重	80kPa
含水比	49.776% (圧密後目標値)
圧密時間	170hr (標準)

なお、パイプ内に不凍水を流すにあたって、不凍水の温度が低すぎると凍結速度が速くなり十分な凍上量が得られない。これまでの実験により、凍結面の進行速度が1mm/hr程度の際に比較的十分な凍上量が期待できることから、この凍結速度に近づけるよう不凍水の温度を時間的にコントロールすることとした。

## 5. まとめ

実験装置を作成し、現在、凍結実験中である。計測結果とその評価については、今後の研究成果を待って行う予定である。

## 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 .
- 2) Williams, P. J. : "Pipelines & Permafrost", Science in a Cold Climate, Carleton University Press Inc . pp . 62-77, 1986 .
- 3) 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 .
- 4) 社団法人地盤工学会: 凍上量予測のための土の凍上試験方法 (JGS0171-2003), 地盤工学会基準・同解説 VII, 2003