

軸対称凍結モデルによるフロストバルブとパイプとの凍着強度

Adfreeze strength between frost bulb and pipeline with an axis-symmetric freezing experiment

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 岡本 玄 (Hikaru Okamoto)
 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 学生員 西尾 淳 (Jun Nishio)

1. はじめに

クリーンなエネルギーとして更なる需要の高まりが予想される天然ガスは、アラスカやシベリアなどの北方圏域に集中して分布しており、安定的な供給を確保するためには、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、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。このような問題を解決するために、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。

これまでに著者らが行ってきた実験により、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およびフロストバルブ内の応力度分布が徐々に明らかになってきた。それに加えて、凍土・氷層が構造物に与える影響を把握する上で、凍土・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、凍着が連続的に保持され、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、凍土・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、これらの因子に支配される凍着強度の把握に注力することとし、その因子を変化させながら凍着強度への影響を実験的に捉えるとともに、現象説明と凍着力の定量的評価を行うことを目的とする。

2. 凍着強度実験

二重円筒厚肉モールドで成型した供試体を圧密し、供試体内部に設けた冷却パイプの周辺にフロストバルブを生成させる。軸対称凍結モデルは、パイプラインに見立てた冷却パイプに冷却水を循環させ、鉛直方向への膨張を抑制しながら、パイプを中心とした同心円状のフロストバルブを供試体内に生成させるものである。この方法で凍結させることにより、パイプとフロストバルブの力学的相互作用問題は、応力の作用方向が管理しやすい軸対称擬似次元問題として扱うことができる。この際の供試体外周面での拘束圧力は、供試体を包むメンブレンからの圧力である。こうして作成された供試体を加圧フレームにセットして、冷却パイプのみに鉛直下方の荷重を作用させることにより直接凍着強度が求められる。実験装置の概要を図-1に示す。

この凍着強度実験では、パイプ内温度や鉛直下方の荷重の他、変位計を設置して冷却パイプの鉛直方向変位を計測する。変位を計測する理由は、凍着強度は荷重速度の違いによるひずみ速度にも大きな影響を受けると考えられるためである。

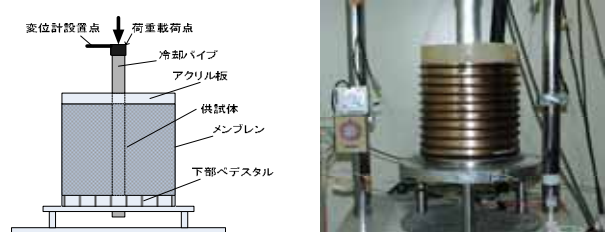


図-1 凍着強度実験モデル

試料の実験条件は表-1に示すとおりであり、以下の手順に従って実験を行った。

- ① 二重円筒モールド内に供試体を流し込み、圧密する。このときの圧密条件は、両面排水により 50kPa で 12hr, 100kPa で 24hr, 200kPa で 72hr である。
- ② 冷却パイプ内に冷却水を循環させて凍結させる。このとき、フロストバルブの凍結速度が 1mm/hr.となるように冷却水の温度を調整する。
- ③ 冷却水温度が目標の温度に達し、フロストバルブの成長が収束した時をもって実験開始とする。
- ④ 冷却パイプの鉛直方向変位計測のための変位計を設置する。
- ⑤ 冷却パイプ上部に設置されたペロフラムシリンダーによって荷重を載荷する。このとき載荷荷重を 10sec.ごとに 0.11kN ずつ増加させていく。
- ⑥ パイプとフロストバルブの凍着が破断したとき(荷重を保持した状態で変位が急激に増加したとき)をもって終了とする。なお、凍着破断後のパイプの最大変位が 15mm に収まるようストッパーを設置しておく。

3. 実験結果

凍土・氷層とパイプとの凍着強度はフロストバルブの温度に依存する。このため、パイプとフロストバルブの凍着面温度が異なる 4Case について実験を行った。設定した冷却水及びパイプ内面温度は表-2に示す通りである。表-2には各温度での凍着強度も示してある。凍着強度は載荷した荷重(kN)で表すものとし、図-2にはこの結果を示した。

表-1 試料の実験条件

材料	MZ カオリン	圧密荷重	200kPa
土粒子比重	2.64g/cm ³	圧密時間	108hr
含水比 (圧密前)	77.44% (平均)	含水比 (圧密後)	40.05% (平均)
M/レバね値	0.1 N/mm	凍結速度	1mm/hr
室温	1.0°C		

なお、パイプとフロストバルブの接触面に作用する半径方向面圧が、凍着強度に影響を与える可能性が考えられるため、計算により推定されたパイプ外周面での半径方向応力度も併せて表示した。半径方向応力度の算出には、以下の半径方向に沿って離散化したときの応力と変位の関係式を用いた。

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

ここで、 a および b は内径と外径、 $[K]$ は剛性マトリックス、 α は定数、 ν はポアソン比、 ε_t は凍結膨張ひずみである。式(1)の計算条件は表-3 に示す。なお、凍結後の供試体弾性係数は、その温度により変化するのだが、今回は一定のものと仮定して計算した。

図-2 からわかるように、凍着強度はフロストバルブの温度が低いほど大きくなる。よって先に述べたとおり、凍着強度は凍土・氷層の剛性に大きく影響され、また凍着強度と温度の関係はほぼ線形であるといえる。図-3 には荷重-変位曲線を、図-4 には変位-時間曲線を示した。図-3 を見ると、温度に依存して荷重の増分に対する変位増分量が異なり、温度が低くなるほど傾きは小さくなることが読み取れる。これはパイプとフロストバルブ間でのせん断剛性に起因するものと思われる。図-4 から、載荷重は時間的に一定の割合で増加させているのに対し、変位は非線形に変化していき、特に荷重載荷直後は変位の増加量が大きいことがわかる。なお Case-4 では、予定していた荷重でフロストバルブとパイプとの凍着が破断しなかったため、載荷時と同じ割合で除荷した。

4. 考察

図-2 を見ると、凍着強度は半径方向面圧よりも温度変化の影響を大きく受けていると考えられる。しかし、半径方向面圧の推定に用いた計算モデルでは、フロストバルブの弾性係数設定に温度依存性が考慮されておらず、供試体外周面での拘束圧力もメンブレンによる拘束のケースしか検討していない。このため、計算モデルの改善や、より高い拘束下での実験等を通じて、更に検討する必要がある。

図-4 の Case-4 のグラフに着目してみると、荷重を取り除いていった後に、変位がゼロに戻っており、その曲線はほぼ左右対称となっている。このことは、フロストバルブとパイプ間の凍着が弾性的であることを示しているのだが、その変位曲線は必ずしも線形であるとはいえない。

表-2 実験結果

Case No.	冷却水温度	パイプ内面温度	凍着強度
Case-1	-3°C	-1.4°C	2.3kN
Case-2	-5°C	-3.2°C	4.1kN
Case-3	-7°C	-5.0°C	6.7kN
Case-4	-10°C	-6.8°C	凍着破断前に除荷

表-3 計算条件

冷却パイプ半径(外側)	25mm	冷却パイプ弾性係数	210 GPa
供試体半径(外側)	100mm	冷却パイプポアソン比	0.3
供試体ポアソン比	0.2	供試体弾性係数(凍結前)	500 MPa
供試体高さ	200mm	(凍結後)	1000 MPa

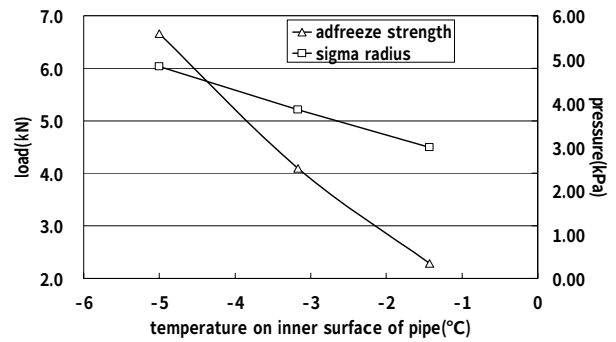


図-2 凍着強度の温度変化

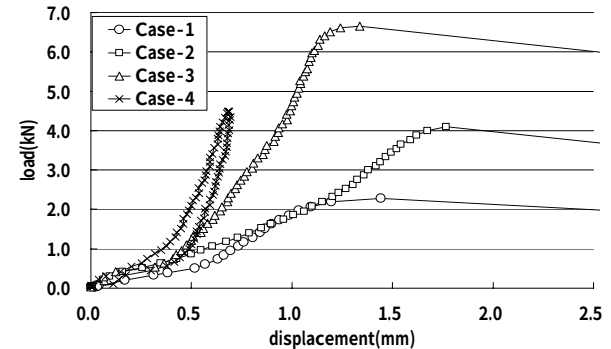


図-3 荷重-変位曲線

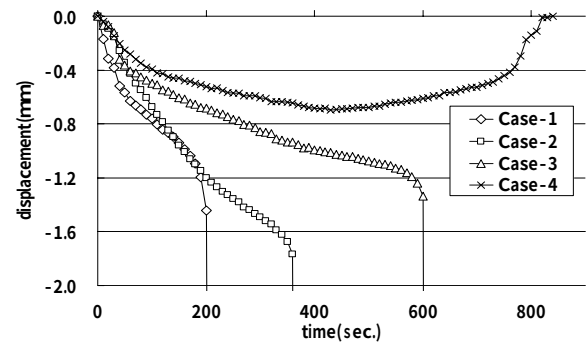


図-4 変位-時間曲線

5. まとめ

本研究により、フロストバルブの温度が凍着強度に与える影響の度合いを概ね把握することが出来たと考える。今後は、金属製の拘束バンドを用いて側方拘束圧を変化させることにより、接触面の面圧が凍着強度に与える影響の把握を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 西尾淳, 蟹江俊仁, 赤川敏, 山下俊彦: 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, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62,3-133, 2007