

フロストバルブとパイプとの相互作用が凍着強度特性に与える影響

Effect of interaction between frost bulb and pipeline on characteristics of abfreeze strength

北海道大学工学部国土政策学コース ○学生員 西 槇彦
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 蟹江 俊仁
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 赤川 敏
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 岡本 玄

1. はじめに

現在、地球温暖化が世界的な問題となっているが、その対策として、化石燃料の中でも環境負荷の小さな天然ガスの利用が有効である。未開発の天然ガスはその多くがアラスカやシベリアといった北方圏に分布しており、安定的な供給を確保するには生産地と消費地を結ぶパイプラインネットワークを構築し、活用していくことが望ましい。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パイプラインは、地表部付近の地盤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により、周辺地盤との複雑な相互作用が発生し、予期せぬ上昇や沈下の被害が生じている。このような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必要である。

これまでに著者らが行ってきた実験によって、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には、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によって成型した供試体を圧密し、軸対称凍結モデルとなるように、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。軸対称凍結モデルとは、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一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は、供試体を包むメンブレンによるものと金属製の拘束バン

ドによるものの2種類である。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に示した。

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、載荷重とフロストバルブとパイプ間の変位の増加量の関係を明らかにするためである。

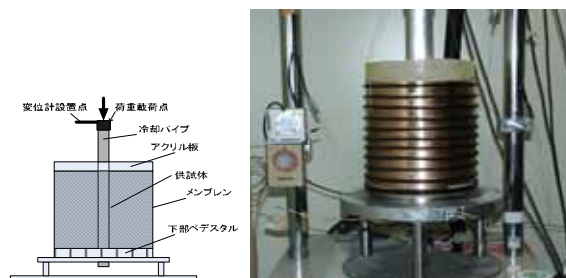


図-1 凍着強度実験モデル

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。

- (i) 二重円筒厚肉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、両面排水で 200kPa とする。
- (ii) 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、冷却水の温度を調整してフロストバルブの凍結速度が 1mm/hr となるようにする。
- (iii) 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凍結強度実験を開始する。
- (iv) 荷重載荷に先立って、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。
- (v) 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、時間毎に一定の割合で荷重を載荷する。
- (vi) 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。

なお凍着が破断せず、鉛直荷重が作用し続けることによって、フロストバルブとパイプ間の相対変位にクリープ現象が発生する。このため、凍着強度実験とは圧密条件等が若干異なるものの、別途クリープ実験を実施し、鉛直荷重保持状態での相対変位の時間的変化を観測することとした。

3. 実験結果

パイプとフロストバルブとの凍着強度は、フロストバルブの温度と、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に関係すると考えられるため、パイプとフロストバルブの凍着面強度と供試体外縁での拘束圧が異なる 7Case について実験を行った。ここで設定した冷却水及びパイプ内面温度、各温度での凍着強度、半径方向面圧を表-2 に示した。凍着強度は載荷した荷重(kN) で表しており、図-2 にその結果を示した。

図-2 から、凍着強度はフロストバルブの温度が低いほど、また外縁拘束がある方が大きくなることがわかる。このことから凍着強度は凍土・氷層の剛性と半径方向面圧に影響され、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拘束の有無で比較したものを示した。この図より、載荷重に対する変位の増分量が温度に依存することがわかる。また載荷重を一定の割合で変化させているのに対し、変位は非線形となり、特に載荷直後の変位の増加量が大きいことがわかる。

拘束が無い場合は、ある荷重に達したとき急激に変位が増大する脆性的な挙動を示すのに対し、拘束がある場合は、高い非線形性を示すが靱性が高まる傾向が見られる。その結果、拘束が無い場合と比べて高い凍着強度が得られると同時に高い変形追従性能が得られた。このことから、拘束は脆性的な変形を抑制する効果があると考えられる。このような挙動の差異をもたらした原因として、フロストバルブとパイプ間に作用する直応力に着目した。表-2 にパイプ内面で計測された周方向ひずみを基に計算したフロストバルブとパイプ間に作用する半径方向面圧を示した。

これによれば、半径方向面圧は拘束が無い場合は引張応力であるのに対し、拘束がある場合は圧縮応力となっている。すなわち、フロストバルブとパイプ間との接触面に作用する直応力は、フロストバルブとパイプ間のせん断抵抗力に影響を与えていると考えられる。

図-4 には、クリープ曲線を拘束の有無で比較したものを示した。この実験では、圧密強度と圧密時間をやや変化させ、凍着強度実験とは異なる圧密度を採用し、載荷重を約 6.7kN、パイプ内温度は-3.6℃としている。この場合でも、拘束が無い場合は約 4mm 変形した所で脆性的な挙動を示し、拘束がある場合はその後も変形が続いている。このことから、クリープに関しても拘束の有無によって、脆性的あるいは靱性的な変形が起こりうる。

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	168hr
含水比 (圧密前)	77.44% (平均)	含水比 (圧密後)	40.05% (平均)
室温	1.0	凍結速度	1mm/hr

表-2 実験結果

Case No.	外縁拘束	冷却水温度	パイプ内面温度	凍着強度	半径方向面圧
Case-1	無	-3	-1.4	2.3kN	2.7MPa
Case-2	無	-5	-3.2	4.1kN	3.9MPa
Case-3	無	-7	-5.0	6.7kN	5.2MPa
Case-4	無	-10	-6.8	凍着破断前に除荷	未計算
Case-5	有	-3	-1.3	3.1kN	-4.8MPa
Case-6	有	-5	-2.7	4.8kN	-5.7MPa
Case-7	有	-6	-3.4	6.1kN	計算不可

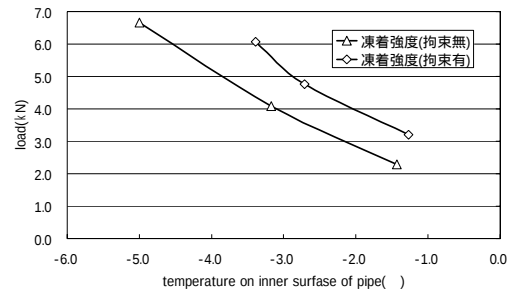


図-2 凍着強度結果

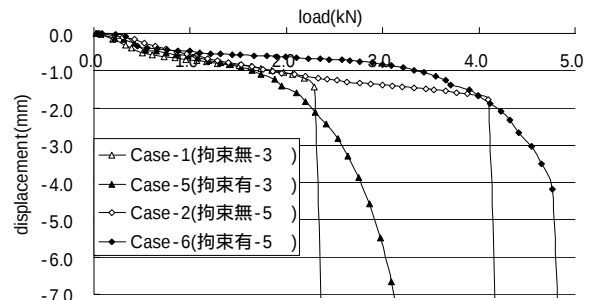


図-3 荷重変位相関図

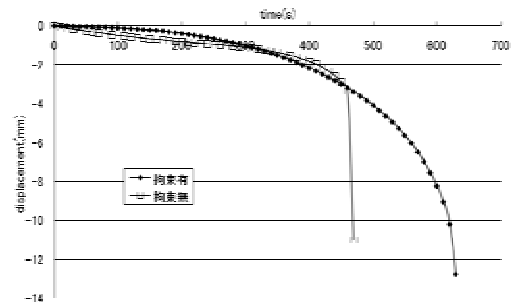


図-4 クリープ現象比較

4. まとめ

本研究により、以下のことが明らかになった。

- ・凍着強度には明確な温度依存性が見られた。
- ・外縁拘束の有無によって、凍着強度自体に差が見られ、荷重-変位関係には靱性の向上が認められた。
- ・クリープに関しても、拘束の有無によって脆性的あるいは靱性的な変形が見られた。

ただし、フロストバルブ内での応力計算においては、温度勾配に応じた弾性係数の変化を考慮しておらず、この点の改善を今後の課題として取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 岡本玄, 蟹江俊仁, 赤川敏, 西尾淳: 軸対象凍結モデルによるフロストバルブとパイプとの凍結強度, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.64, C-4, 2008
- 2) 岡本玄, 蟹江俊仁, 赤川敏, 横山正臣: 軸対象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特性, 土木学会第 63 回年次学術講演会論文報告集, iii-433, Vol.63, 2008