

凍土とパイプラインとの相互作用に関する一考察

(株)ドーコン 正会員 福富 隆史
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 蟹江 俊仁
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 赤川 敏
 アラスカ大学フェアバンクス校 正会員 金 高義

1. 研究の背景と目的

シベリアを中心とした天然ガスの存在地帯には永久凍土が点在する。供給手段としてパイプラインの建設が求められているが、この永久凍土によるパイプライン損傷、破損の事例が数多く報告されている。その中でも、永久凍土と季節凍土との境界面において最も極端な状況が生じていることが確認されている。本研究ではアラスカ州フェアバンクスでの実物大パイプラインを用いた原位置試験に基づき、当該領域での凍土とパイプラインとの相互作用に関する一考察を行った。

2. 原位置実験の概要

図1に原位置試験概略とパイプ諸元を示す。

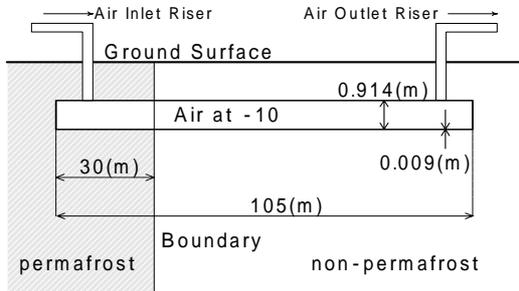


図1 埋設状況

観測データとして、パイプ変位・パイプ内温度・周辺地盤温度が得られており、図2に任意の時間断面についてのパイプ変形データを示す。境界面付近で大きく変位している様子が見えてくる。

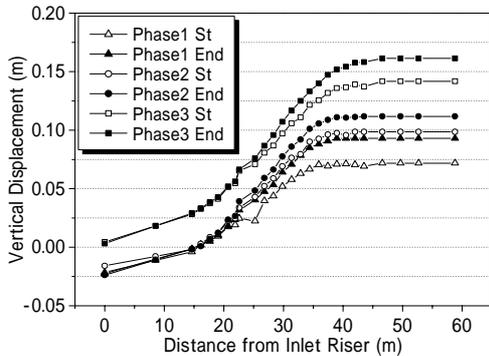


図2 パイプ鉛直変位データ

3. 弾性床上梁モデル

パイプ-バネ連成モデルを考える。モデル化にあたっての仮定条件は以下の通りである。

- ・パイプラインと地盤は弾性床上梁にモデル化する
- ・パイプの剛性のみ($E_p I_p$)を考慮する
- ・地盤バネ値(k_p)は永久凍土側(Soil 1)と季節凍土側(Soil 2)で同一とする
- ・凍上圧は等分布荷重を想定し、Soil 1で q_{p1} 、Soil 2で q_{p2} とする

図3にそのモデル図を示す。

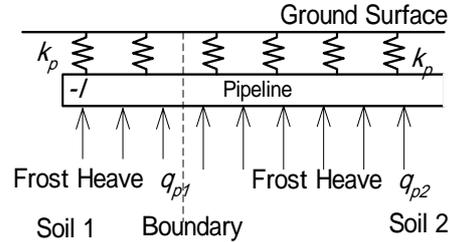


図3 弾性床上梁モデル図

基礎方程式は、無限遠条件を考慮して

$$w_1(x) = e^{\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) + q_{p1}/k_p \quad (1)$$

$$w_2(x) = e^{-\lambda x} (D_1 \cos \lambda x + D_2 \sin \lambda x) + q_{p2}/k_p \quad (2)$$

特性値は、 $\lambda = \sqrt[4]{k_p / 4E_p I_p}$

以上の仮定を踏まえて微分方程式を解くと、

$$w_1(x) = \frac{-q_{p1} + q_{p2}}{q_{p2}} \delta \times [e^{\lambda x} \cos \lambda x + e^{-(2l+x)\lambda} \{(1 - \sin 2l\lambda) \cos \lambda x - (1 - \cos 2l\lambda) \sin \lambda x\}] + \frac{q_{p1}}{q_{p2}} \delta \quad (3)$$

$$w_2(x) = \frac{-q_{p1} + q_{p2}}{2q_{p2}} \delta \times e^{-(2l+x)\lambda} [1 - e^{2l\lambda} - \sin 2l\lambda] \cos \lambda x - (1 - \cos 2l\lambda) \sin \lambda x + \delta \quad (4)$$

式に含まれるパラメーター(q_{p1} , q_{p2} , l , δ)は、(3), (4)式と観測された変位データを用いて最小自乗法により同定した。

4. フロストバルブを考慮した合成断面

パイプ周囲のフロストバルブなる管状凍土を考慮するため、パイプ断面方向について考えた。フロストバルブの曲げ剛性も含めて考えた場合についてもバネ値と凍上圧、バネ値と剛性の比は一定であることから

$$1/\delta = k_p / q_p = k_c / q_c = const. \quad (5)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{k_p / 4E_p I_p} = \sqrt[4]{k_c / 4E_c I_c} = const. \quad (6)$$

が成り立つ。(添え字 c は合成断面時)

5. Active Layer の押さえ効果モデル

地盤バネ値を Active Layer なる凍結融解層の押さえつけ効果として図4のようにモデル化し、クラックの有無による2つの状況(図5, 6)を想定した。

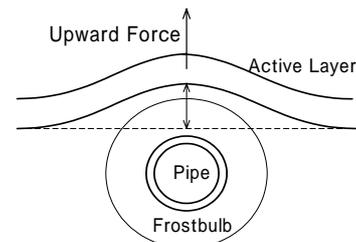
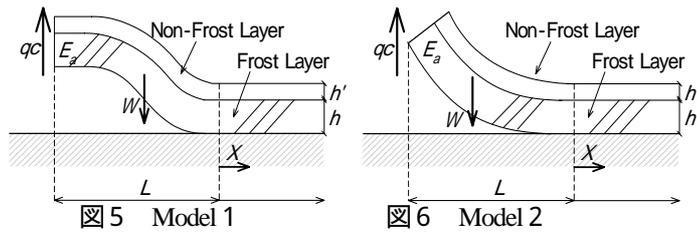


図4 フロストバルブと Active Layer

キーワード 永久凍土 季節凍土 弾性床上梁モデル フロストバルブ 高志の式

連絡先 〒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 011-706-6176

図5, 6はActive Layerの片側のみを示したものである。



パイプ直上部における荷重と変位の関係から地盤バネ値を推定するため、Active Layerの地盤接触条件を考慮して変形を考えると、

$$\text{未接触部: } E_a I_a \frac{d^4 y_L}{dx^4} = -W \quad (7)$$

$$\text{接触部: } E_a I_a \frac{d^4 y_R}{dx^4} = -W + ky_R \quad (8)$$

(Active Layerの自重分 $W=(wh+w'h')$)
左端における境界条件と $x=0$ における連続条件、無限遠条件を用い、Active Layer 端部での地盤バネ値は以下のように表せる。

$$\text{Model 1: } k_{c1} = 64(wh+w'h')^3 E_a I_a / 9q_c^3 \quad (9)$$

$$\text{Model 2: } k_{c2} = 3(wh+w'h')^3 E_a I_a / q_c^3 \quad (10)$$

となる。Active Layerの押さえ効果モデルから求められる地盤バネ値 k_c と、式(5)で与えられるフロストバルブの剛性も加味した弾性床土梁モデルの地盤バネ値 k_c が同時に満足される条件を示したものが図7である。

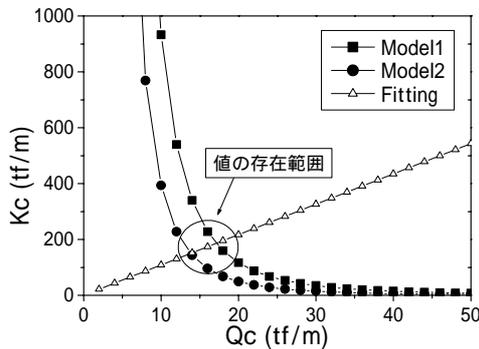


図7 凍上圧・地盤バネ値の推定

Active Layerの押さえ効果による地盤バネ値はクラックの有無による2ケースを想定しており、実際の凍上圧はこの2ケースの範囲内に存在すると考えた。

図8, 9は本手法に基づき2週間間隔で求めた凍上圧と地盤バネ値の結果である。時間経過とともに凍上圧・地盤バネ値が上昇していることが確認できる。

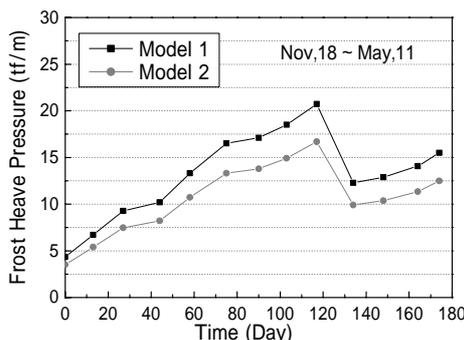


図8 凍上圧の推移

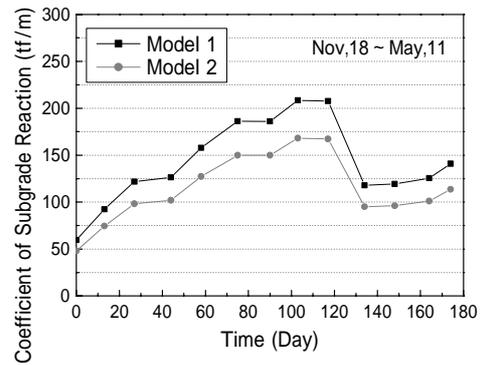


図9 地盤バネ値の推移

6. 実験式との比較

LNG 地下タンク的设计などに広く用いられている経験式、「高志の式」との結果比較を行った。高志の式を(11)に、結果を図10に示す。

$$\xi = \xi_0 + (100\sigma_0/\sigma)(1 + \sqrt{U_0/U}) \quad (11)$$

：土の凍結膨張率(%)

：凍結面に作用する有効拘束圧(kpa)

U : 凍結面の進行速度(mm/hr)

σ_0, σ, U_0 : 室内試験から求められるパラメーター

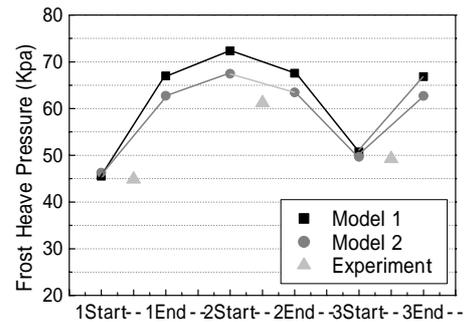


図10 高志の式の結果との凍上圧比較

図10に示す通り、比較的良好な整合性を示していることがわかる。

7. 結果考察

本手法により想定された凍上圧は概ね妥当な値を示していると考えられる。しかし、クリープ現象による地盤バネ値の変化やActive Layer厚の不均一性等の影響は含まれておらず、より高精度な検討が引き続き必要であると考ええる。

参考文献

- 1) T.Tanaka,K.O'hashi,S.Akagawa,M.Fukuda : Design of Chilled Pipelines Buried in Discontinuous Permafrost and Field Experiment in Fairbanks Alaska,the 6 International Conference on Northeast Asian Natural Gas Pipeline,p1-7,2000.
- 2) 小野紘一:アジアにおける天然ガスパイプラインの建設、トンネル技術の特別講演と技術研究発表会論文集,p1-10,2000.