

チルドガスパイプラインの凍上挙動評価モデルの検討

Frost Heave Model for Chilled Gas pipeline

北海道大学工学部土木工学科
北海道大学大学院工学研究科○学生員 福富隆史(Takashi Fukutomi)
正 員 蟹江俊仁(Shunji Kanie)

1. はじめに

石油から燃料電池時代への良好な橋渡しとして天然ガスの需要が近い将来高まることが予想される。しかし、その存賦地域は北方圏域に集中している上、凍土地帯では地中埋設されたパイプラインの損傷事例が多く報告されている(参考文献, 3))。本研究は、こうした損傷の原因や現象の究明を目標に、実物大のチルドガスパイプラインを用いて行われた実験データを用い、基本的な凍上挙動評価モデルを構築しようとするものである。

2. 原位置実験の概要

使用データは、アラスカ州フェアバンクスにて実施されている実物大パイプラインによる原位置実験によるものである。パイプサイズ全長 105m, 外径 91.4cm, 肉厚 0.9cm。管内には一定圧力(1.54×10^4 kpa), 一定温度(-10°C)に保たれた空気が流されており、地下 0.9m(土被り厚)の位置に埋設されている。図 1 にその概略を示す。

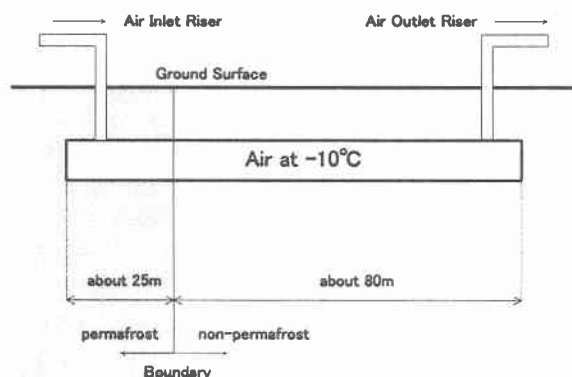


図 1 埋設状況

3. 観測変位データ

データは 1999 年 12 月から約一週間ごとに、初期状態を 0 とした鉛直変位を約 30 箇所観測している。観測されたデータを見ると、コンプレッサの不調によるパイプ内圧の変動や、内部温度の上昇下降などが一部に見られるが、本研究では、内圧、温度とも安定的に推移している期間を取り出して検討を行うこととした(表 1)。検討対象となった 3 つの計測期間の最初と最後の変位の挙動を図 2 に示す。図中、観測位置 25m あたりに永久凍土部と季節凍土部(季節によって上部土層が凍結融解を繰り返す部分)があり、季節凍土部(観測位置 > 25m 付近)で大きな上昇変位が見られている。

表 1 データ採用期間一覧

	Start	End
Phase 1	2000/11/18	2001/02/16
Phase 2	2001/03/01	2001/05/11
Phase 3	2001/11/16	2002/05/31

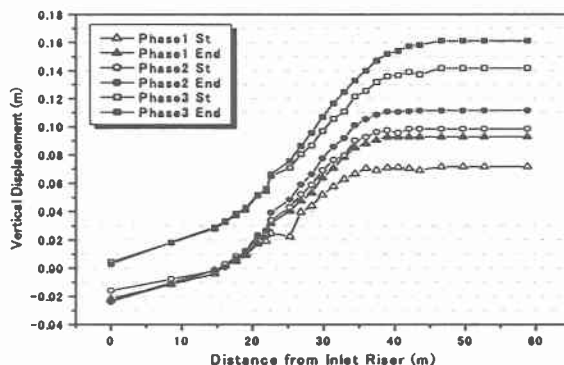


図 2 パイプ変位の推移 Phase 1 ~ Phase 3

4. パイプライン-地盤バネの連成モデル

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土梁にモデル化
- ・地盤バネ値は永久凍土側地盤(Soil 1)と季節凍土側地盤(Soil 2)で同一
- ・凍上圧は各地盤で一定とし、Soil 1 で q_1 , Soil 2 で q_2 とする
- ・Soil 1 と Soil 2 との境界面で連続条件を用いる

基礎方程式は、無限遠条件を考慮して

$$w_1(x) = e^{\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) + \frac{q_1}{K_s} \quad (1)$$

$$w_2(x) = e^{-\lambda x} (D_1 \cos \lambda x + D_2 \sin \lambda x) + \frac{q_2}{K_s} \quad (2)$$

$$\text{ここで, } \lambda = \sqrt{\frac{4K_s}{EI}}$$

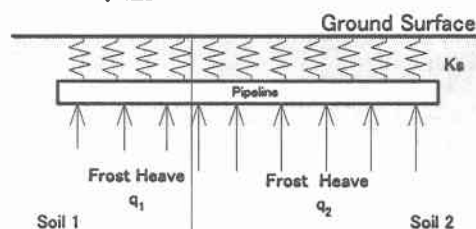


図 3 パイプ-地盤バネ連成モデル

以上の仮定を踏まえて微分方程式を解くと、

$$w_1(x) = \frac{-q_1 + q_2}{q_2} \delta \times \left[e^{\lambda x} \cos \lambda x + e^{-(2+\lambda)x} \left\{ (1 - \sin 2\lambda) \cos \lambda x - (1 - \cos 2\lambda) \sin \lambda x \right\} \right] + \frac{q_1}{q_2} \delta \quad (3)$$

$$w_2(x) = \frac{-q_1 + q_2}{2q_2} \delta \times e^{-(2+\lambda)x} \left\{ (1 - e^{2\lambda}) - \sin 2\lambda \right\} \cos \lambda x - (1 - \cos 2\lambda) \sin \lambda x \Big] + \delta \quad (4)$$

(3), (4)式中に含まれる4つのパラメーター(q_1 , q_2 , l , λ)は, 最小自乗法により同定するものとする. 即ち, 式(5)の最小条件を求めることとなる.

$$\Pi = \sum \{\hat{y}_i - w_{1i}(x)\}^2 + \sum \{\hat{y}_i - w_{2i}(x)\}^2 \quad (5)$$

結果は図4と表2の通りである.

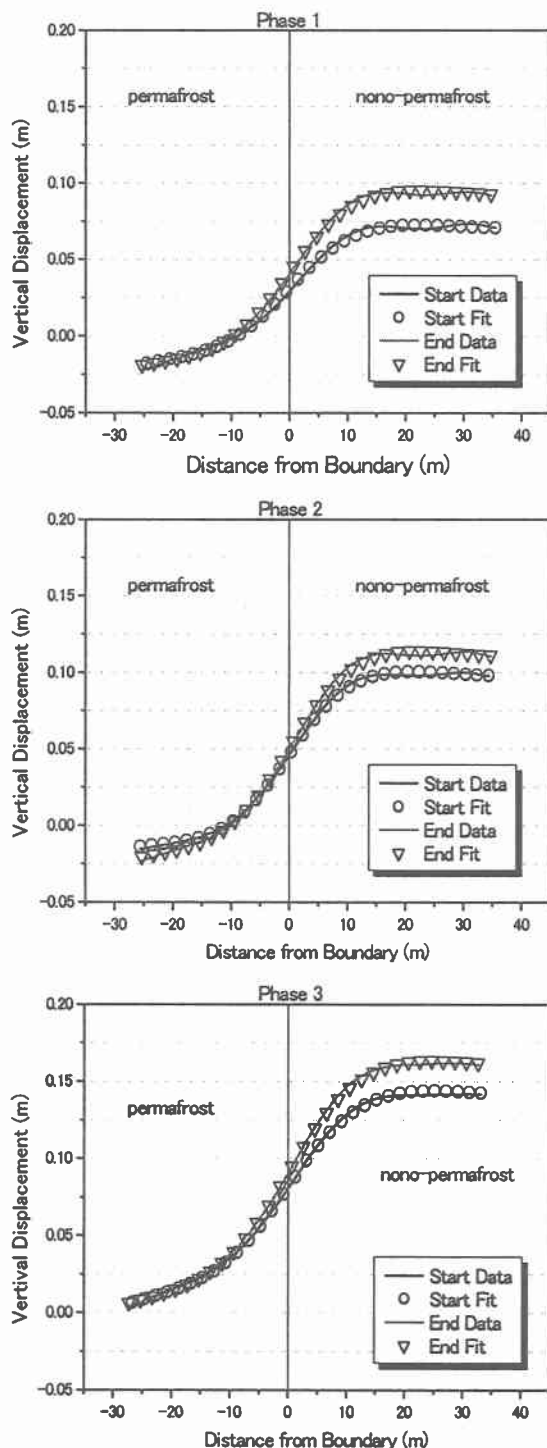


図4 理論解とデータのフィッティング状況

表2 各パラメータの最尤値

	K_s	q_1	q_2	l
Phase1 St	28.7	-0.28	2.0945	24.5
Phase1 End	29.5	-0.28	2.7140	25.3
Phase2 St	35.1	-0.20	3.1164	25.6
Phase2 End	30.5	-0.30	3.3550	25.3
Phase3 St	18.1	0.28	1.9460	26.7
Phase3 End	18.8	0.29	2.2400	27.3

この結果より, まず, 時間経過と共に永久凍土側で凍上圧 q_2 が徐々に増加していることが確認でき, パイプの変位挙動を裏付ける結果が得られた. また, Phase 2と3の間では, 凍上圧, 地盤バネ値共にその連続性が損なわれているが, これは管内温度の変動により, 周辺地盤が凍結融解を繰り返したことが原因と思われる. また, 実際には凍上が生じないと考えられる永久凍土側の q_1 は, パイプ上部のバネ反力, もしくはパイプの自重のような力ではないかと考えられる.

5. まとめと今後の課題

これまでの結果をまとめると, 次のような知見が得られた.

- ・ 両地盤バネ値に対する仮定も含め, 弾性床上梁によるモデル化の妥当性は概ね確認された.
- ・ 変位上昇に応じた凍上圧増加が確認された.
- ・ 時間経過に伴って地盤バネ値のも増加すると思われる.
- ・ パイプ変位量は, 凍土自体の弾性係数と比較して極めて小さいものと思われる.
- ・ 時間の経過に伴って, 境界面の季節凍土側への進行が見られた.

なお, 本モデルの実用化に向けては更に検討すべき課題がある. 例えば, パイプ周囲のフロストバルブなる管状凍土もその一つである. 実際の凍上圧力はこのフロストバルブの外周面において作用しているものと思われる.

今回の検討では, パイプの曲げ剛性 $E_p I_p$ のみを用いてパラメータの同定を行っているが, フロストバルブの曲げ剛性 $E_p I_p$ も含めて考えた場合, パイプ位置での変位の同一性より, 次の関係が成立する.

$$\delta = \frac{q_p}{K_{sp}} = \frac{q_c}{K_{sc}}, \quad \sqrt[4]{\frac{K_{sp}}{4E_p I_p}} = \sqrt[4]{\frac{K_{sc}}{4E_c I_c}} \quad (6)$$

$$\therefore \frac{E_c I_c}{E_p I_p} = \frac{q_c}{q_p} \quad (7)$$

ここに,

K_{sp} , K_{sc} : それぞれパイプ剛性, あるいは合成断面剛性を見込んだ時の地盤バネ係数

q_c : 合成断面剛性を適用した場合の換算凍上圧

これらの関係から, 想定される合成断面の剛性が与えられれば, (7)式に基づいて, 等価な変形をパイプラインならびにフロストバルブに生じせしめるための荷重強度 q_c が求められることになる.

今後, さらに上記のような検討を行うことにより, パイプの凍上挙動に対する適切なモデルの確立につなげていきたいと考える.

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) 川本眺万: 応用弾性学,共立出版,1974.
- 3) 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.