

凍上試験によるチルドガスパイプラインの凍上挙動の一考察

Frost Heave Behavior of Buried Chilled Gas Pipelines With In-situ Soil Frost Heave Test

北海道大学大学院工学研究科 ○学生会員 金高義(Ko Ui Kim)
北海道大学大学院工学研究科 正会員 赤川敏(Satoshi Akagawa)

1. はじめに

シベリア・アラスカをはじめとする永久凍土地帯には多くのガスパイプライン構想が存在している。ガス(天然ガス)は、パイプラインで輸送する際、永久凍土の融解に伴う不具合を防止する目的で、負の温度に冷却して運搬される(チルドガスパイプライン)。しかしながら永久凍土地帯に一部分布する未凍土区間においては、パイプライン周囲に凍土が成長し、それによる凍上被害が予想される。唯一既存の永久凍土地帯を通過する西シベリアの大規模ガスパイプラインからは原因は不明であるが、生産量の1~5%が大気へ漏洩していることが知られている。また漏洩したガスは地球温暖化を促進させることにもなる。このような事故を防止する設計・施工方法を提唱するためには永久凍土とパイプラインの相互作用を研究する必要がある。我々は想定される最も過酷な状況(不連続永久凍土)における実物大実験をアラスカ州フェアバンクスにて実施している。発生する被害を定量的に予測するためには凍土の物性値の把握が不可欠である。現在までに室内凍上試験として凍上試験、一軸圧縮試験、熱伝導率測定試験を行った。今回は季節凍土側の凍上によるパイプ変位量を室内凍上試験の結果より定量予測することを試みた。

2. 原位置実験条件

図1に示すように全長105m、口径91.4cm、板厚0.9cmのパイプを南北に、永久凍土と季節凍土を横切るよう土かぶり厚さ0.9mで埋設した。管内には圧力一定(16kg/cm²)、温度一定(-10℃)の空気を循環し、種々の計測を行っている。以下にその主なものを示す。

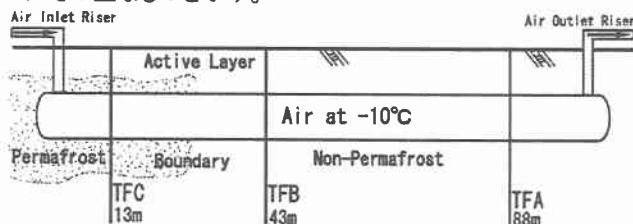


図1 パイプ埋設状況と Thermal Fence 位置

2.1 地盤温度計測

伝熱環境の異なる永久凍土および季節凍土区間の2面、またその両者の相互作用の予想される境界面近傍面の計3面にてパイプに直交する面における温度計測を行った。温度計測点の配置点数は150点である。空気入り口より43mの距離にある断面(TFB)での温度計測状況を図2に示す。

2.2 パイプ鉛直変位計測

鉛直変位が大きく変化すると予想される永久凍土/季節凍土境界前後を重点的に、パイプ鉛直変位計測をレベル測量によって行った。変位計測点数は28点である。

2.3 パイプ直下の凍上量計測

凍上が予想される季節凍土側において、パイプ直下の1mの地盤に対して凍上量計測を行った。計測点数は5点とした。

2.4 パイプひずみ計測

凍上に伴いパイプに大きなひずみが発生すると予想される永久凍土/季節凍土境界前後の位置において重点的にパイプのひずみ計測をストレインゲージによって行った。計測点数は40点とした。

2.1、2.2、2.3、2.4 各計測位置は簡易なパイプの曲げに関する数値解析の結果を活用して決定した。

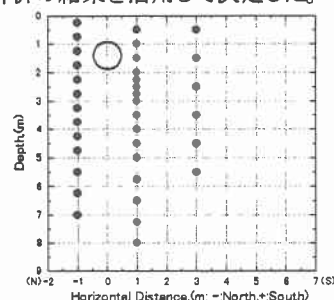


図2 空気入り口から43m位置断面(TFB)における温度計測点

3. 室内凍上試験

3.1 供試体

パイプ設置工事の際にサンプリングした、パイプ直下にあたる位置の不覚乱試料を土試料として用いた。これを直径58mm、高さ30mmとなるように成形した。粒度分布を図3に、物理特性を表1に示す。表1に関して、フェアバンクスシルトは鋭敏比が非常に大きく、液性・塑性限界が測定不能だった。

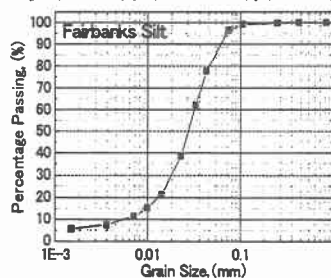


図3 粒径加積曲線

表1 フェアバンクスシルト物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.746
含水比 (%)	28.9
液性限界 W_L (%)	NP
塑性限界 W_P (%)	NP

3.2 実験方法

凍上量の凍結速度、上載圧依存性を把握するために、温度降下条件と上載圧を変えて凍上試験を行った。温度降下条件はベDESTAL温度片端面降下式(高志式)とした。凍結速度は原位置実験における地盤温度計測結果から、実際の凍結進行速度の範囲内に入るように設定した。上載圧も原位置実験におけるパイプの埋設深さから設定した。図4には設定した3種類の温度降下条件とその計測値を示す。表2に3種類の拘束条件を示す。凍上試験は合計9種類の条件で実施した。

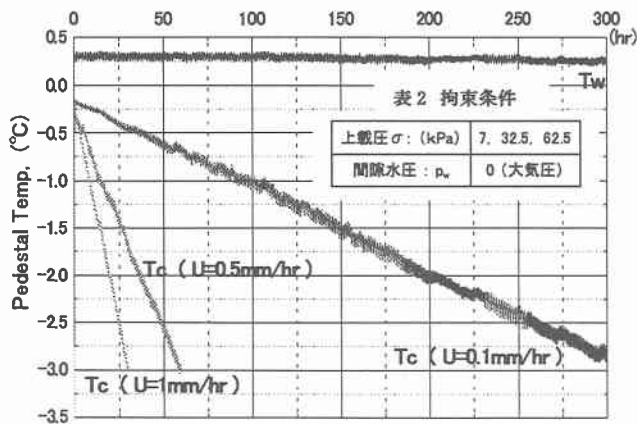


図4 温度降下条件と計測値

3.3 凍上試験結果

試験より得られた凍結面進行速度、凍上率、吸排水速度を表3に示す。凍上率の凍結面進行速度依存性、拘束圧依存性を図5より検討した。U0.5- σ 32.5の試験は良好には合致しないが、上載圧が小さいほど、凍上率が大きく、また、凍結面進行速度が小さいほど凍上率が大きく発生する傾向が認められる。

表3 凍上試験結果

	凍結面進行速度 U (mm/hr)	凍上率 ξ_E (%)	吸排水率 ξ_w (%) +: 吸水
U0.1- σ 7	0.31	34.07	30.54
U0.1- σ 32.5	0.27	21.30	19.20
U0.1- σ 62.5	0.30	4.96	2.63
U0.5- σ 7	0.69	26.30	21.62
U0.5- σ 32.5	1.05	5.18	2.54
U0.5- σ 62.5	1.16	2.15	0.18
U1- σ 7	1.72	11.11	8.23
U1- σ 32.5	1.47	7.19	4.52
U1- σ 62.5	1.68	1.97	-0.53

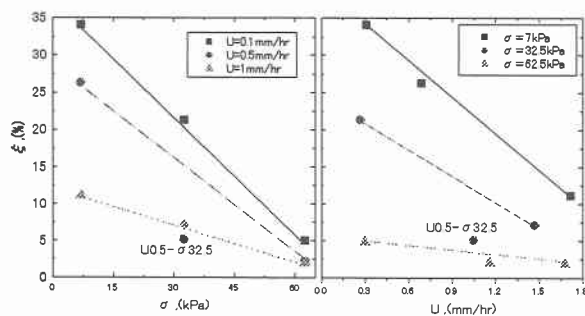


図5 凍上率の凍結面進行速度、拘束圧依存性

3.4 室内試験結果の高志の式への適用

前節まで記述した室内凍上試験の結果を一般に広く用いられている式(1)に示す高志の式¹⁾を用いて整理する。高志の式は人工凍結工法やLNG地下タンク的设计に広く用いられている。

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

ξ : 土の凍結膨張率(%)

σ : 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)

ξ_0, σ_0, U_0 : 室内試験から求められる定数

室内試験結果より得られたフェアバンクスシルトの高志の式における諸定数を表4に示す。表4の固有値と、表3の室内実験における凍結面進行速度条件、拘束条件を式(1)に代入し、高志の式による予測凍上率 ξ_T を算出した。室内実験からの凍上率 ξ_E と ξ_T を比較するために結果を図6に示す。繰返し数1回の試験結果であることを考慮するとU0.1- σ 32.5のように大きく外れるものもあるとはいえ、室内凍上試験の結果をよく再現しているといえる。以後、原位置実験におけるパイプの凍上挙動の考察とすにあたり、表4の諸定数を用いた高志の式を用いるものとする。

表4 フェアバンクスシルトの高志の式における諸定数

ξ_0 (%)	2.5
σ_0 (kPa)	0.8
U_0 (mm/hr)	0.25

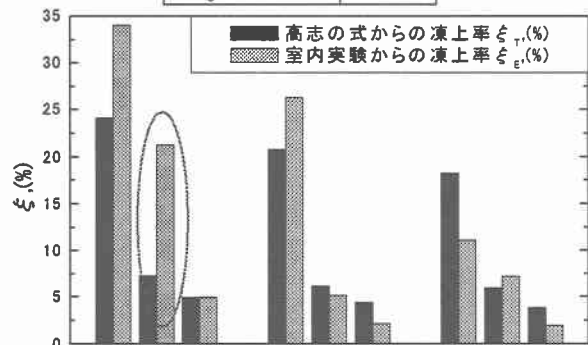


図6 高志の式と実験値からの凍上率

4. 室内凍上試験結果からの原位置実験挙動の推定

4.1 推定方法

前節にて求めた凍上量の予測式(1)を原位置実験地盤に適用する。不連続永久凍土地帯に設置した本実験サイトにて、負の温度の空気を循環させている。そのため季節凍土域においてはパイプ周辺にフロストバルブ(Frost Bulb: 凍土塊)が成長し、凍上によるパイプ変位が発生する。ここに、現地計測より土中温度分布、パイプ変位(凍上変位)は既知である。また、土中温度分布から凍結面の進行具合を推定できる。よって、凍結面進行速度と凍上率が把握できる。以上のデータと式(1)より、上載圧が算定できる。上載圧の変化を把握することより、パイプを変位させている外力、つまりは凍上圧を推定する。

また、高志の式は本来拘束圧が大きいところ(主に拘束圧100kPa以上)での人工凍結工法やLNG地下タンク周囲地盤の凍上量を定量的に把握するために、多数の室内実験から求められた実験式である。よって、地表面近くの凍上について高志の式を利用した例は極めて少ない。今回、拘束圧の小さい地表面付近でもこの定量化式の利用が可能かどうかの検討も含めて考察する。

4.2 上載圧と凍上圧の関係

図7に示すように上載圧と凍上圧がパイプ変位に影響を与えている。パイプ上面に発生する凍上圧は地表面変位として開放されるため、パイプ変位に及ぼす影響はないと考えられる。パイプ側方に発生する凍上圧は左右対称に作用するため水平方向成分は相殺され、考察の対象

とならない。このため、鉛直方向成分の凍上力のみに注目すればよいと考えられる。よって、ここでの凍上圧とは、パイプ下方に発生する力であると考え。今回は、図7の点線部で示すように外力がパイプに作用する面の形状をパイプの曲率とパイプ側方部分の凍土形状を考慮に入れない1次元形状として考察する。パイプの変位が上方向に発生していることより力の釣合いより、凍上圧は上載圧より大きいと考えられるが、近い値を示すと思われる。また、フロストバルブの自重増加は、フロストバルブの成長に伴い増加する凍上圧と相殺されるため、発生しないものとして仮定する。

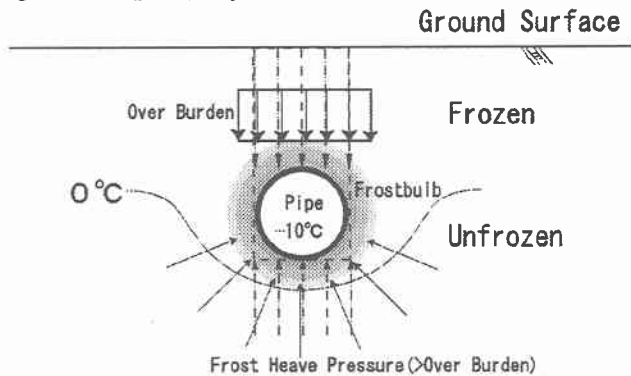


図7 凍上圧と上載圧の力のつりあい

4.3 凍結深度、凍結面進行速度の算定方法

原位置実験における凍上率を前節の仮定の基より把握するためにはパイプ直下における凍結深度、および、凍結面の進行速度の把握が不可欠である。今回はパイプ直下に温度計測点を設定していないため、パイプ側方 1m の凍結面 (h) からパイプ直下の凍結面 (R') の進行具合を推定することとした。以下にその手法を示す。なお、今回は凍上が顕著に発生している空気入り口から 43m 地点の TFB 断面における凍結面の進行に注目する。図2に示すように、パイプの北側 1m (N1) および南側 1m (S1) にて温度計測を行っている。N1, S1 を同物性値の地盤とみなして両計測点のデータをパイプから 1m の距離における同一条件のデータとみなした。

フロストバルブがパイプ直下に同心円状に発達していると仮定する。深度別の計測点における時系列変化と、地盤温度分布を検討することにより、パイプ側方 1m における凍結深度 h が求まる。この値から、土かぶり厚さとパイプ口径、およびパイプ厚さを引くことにより、h' が求まる。また、パイプ中心から 0°C 線までの距離 R はピタゴラスの定理を用い、h' と温度計測線までの水平距離 (1m) により計算することができる。これを、パイプ直下に回転移動させ、パイプ口径の半径、パイプ厚さを引くことにより、パイプ直下の凍土厚さ R' が求まる。凍結面進行速度 U の計算方法は式 (2) に示す。

$$U = \frac{\Delta R'}{T} \quad \dots (2)$$

U: 凍結面進行速度 (mm/hr)

T: 検討対象とする凍結時間

$\Delta R'$: T におけるパイプ直下の凍土成長厚さ (mm)

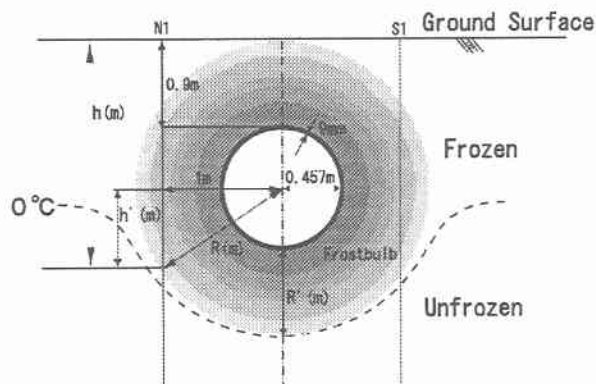


図8 パイプ直下凍結面進行具合の計算方法

4.4 検討期間の決定

パイプ周辺の凍土の成長に影響を与えるのは気温による地表面での温度変化と、パイプの温度の変化である。パイプ入り口から 40m 位置でのパイプの温度時系列変化を図9に示す。パイプの温度が正の温度まで変動している時期があるのが見て取れる。この原因は空気の温度調節器の不具合によるものである。パイプ温度上昇期間の温度分布変化を図10に示す。同図より短期間のパイプ温度上昇が周囲地盤に与える影響は大きいといえる。

循環空気温度が上昇する期間や変動の激しい期間はパイプと地盤は複雑な挙動を示すため、ここでは、パイプの温度が正の温度にならない期間を検討の対象期間として以下のように決定した。

第1期 2000/11/18 ~ 2001/2/16

第2期 2001/3/1 ~ 2001/5/11

第3期 2001/11/16 ~ 2002/5/31

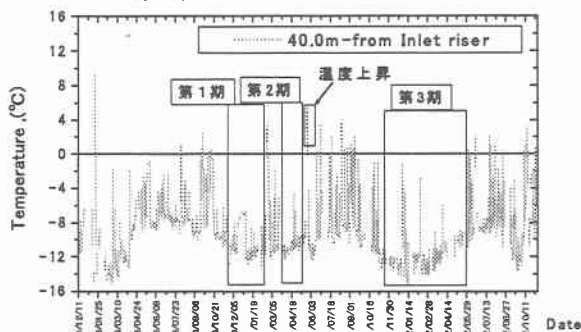


図9 パイプ温度時系列図

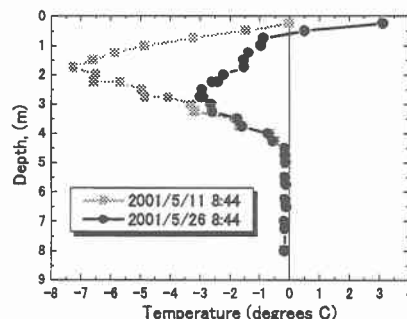


図10 パイプ側方 1m 位置におけるパイプ温度上昇に伴う温度分布変化

4.5 室内凍上試験結果からの凍上率予測

原位置実験における凍結面進行速度は 4.3 の方法より求まる。これを基に式(1)によって予測した原位置凍上率 ξ_p を求めた。この際、パイプの存在や土の凍結時の強度増加などが、

凍上変位を拘束する上載圧となっていると予想されるが、ここでパイプ部分も地盤であるとした。土かぶり厚さを 1.8m、 $\rho_t=1.90\text{g/cm}^3$ として上載圧は期間を問わず 33.6kPa とした。また、凍結面の進行具合 ($\Delta R'$)、パイプ変位を凍上変位 (ΔH) として式 (3) より計算し、TFBにおける原位置凍上率 ξ_r を求めた。原位置実験より計測された各パラメータと、 ξ_p 、 ξ_r の値を表 5 に示す。 ξ_p と ξ_r を比較したものを図 11 に示す。同図より、 ξ_p と ξ_r は比較的良好一致を示す。よって、低拘束圧下においても室内凍上試験の結果より原位置パイプラインの凍上変位量は予測できるものと考えられる。

$$\xi = \frac{\Delta H}{H_0} \quad \cdots (3)$$

ξ : 土の凍結膨張率 (%)
 ΔH : パイプ変位差 (mm)
 $H_0 (= \Delta R' - \Delta H)$: 凍結前のパイプ直下地盤厚さ

表 5 各種パラメータ

	Time, T(hr)	Depth, h(mm)	$\Delta R'$ (mm)	ΔH (mm)	H0(mm)	U(mm/hr)	ξ_p (%)	ξ_r (%)
第1期	2160	4250	282	22	260	0.12	8.2	8.5
第2期	1704	4550	285	16	269	0.158	7.9	6.0
第3期	4704	5100	289	21	268	0.057	9.9	7.6

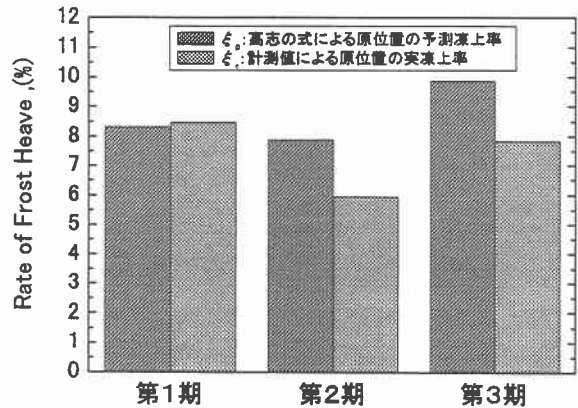


図 11 予測凍上量と実凍上量との比較

4.6 高志の式からの上載圧の予測

式 (1) において、表 5 に示す実測値凍結面進行速度 U 、実凍上率 ξ_r を用い未知数である上載圧 σ を求める。図 12 に計算された上載圧の変動を示す。同図より上載圧 σ は土かぶり厚さ 1.8m のときの上載圧 33.6kPa よりも大きく発生している。同図の影部分が上載圧の変動分である。この変動分がパイプと凍土との相互作用による拘束圧増加分を示している可能性がある。パイプと凍土との相互作用については今のところ評価し難いが、パイプ変形からのパイプに作用する外力を数値解析することにより、評価できる可能性がある。

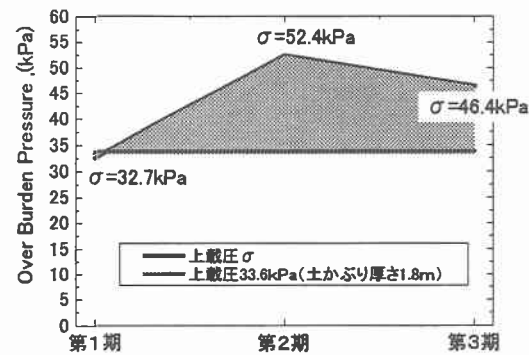


図 12 上載圧の変動

5.まとめ

原位置不攪乱土試料を用いた室内凍上試験より以下に述べる結論を得た。

(1) 凍上率の凍結速度、拘束圧依存性

上載圧が小さいほど、凍上率が大きく、また、凍結面進行速度が小さいほど凍上率が大きく発生する傾向が見られた。

(2) 室内凍上試験結果の高志の式への適用

室内凍上試験の結果からフェアバンクスシルトの高志の式における諸定数を求めた。その諸定数を用いた式 (1) は実験結果を凍結速度、拘束圧依存性を考慮に入れて比較的良好に再現している。

(3) 高志の式の原位置実験への適用

室内凍上試験の結果より求めた高志の式を用いて予測した凍上挙動と、原位置実験の凍上挙動との良好な一致を確認した。

(4) 室内試験結果からの原位置実験挙動の定量化の考え方

原位置実験にて計測している地盤温度より凍結深度と凍結面進行速度を求めた。また、パイプ変位を凍上量とみなすことにより、原位置における実凍上量を求めた。

(1)、(2) より、求めた凍上量の予測式より、原位置凍上量を予測できる可能性があることが分かった。また、凍上予測式を用いて求めた上載圧の値の変動より、凍土とパイプの相互作用を検討できる可能性を認めた。

今回の考察はあくまで予備的なもので、更なるデータ解析により、より精度の高いチルドガスパイプラインの凍上挙動予測が可能になると思われる。

参考文献

1)高志勤,益田稔,山本英夫:土の凍結膨張に及ぼす凍結速度、有効応力に関する研究,雪氷,Vol.36,pp49~68,1974