凍土中に埋設された冷却ガスパイプラインの 凍上変形とその簡易評価法

蟹江 俊仁¹・赤川 敏²・三上 隆³・佐藤 太裕⁴・金 高義⁵

¹正会員 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:kanie@eng.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院特任教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 北海道大学大学院教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 北海道大学大学院助手 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁵学生会員 Doctor Course Student, Grad. School of Engineering, University of Alaska Fairbanks

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、地表面での温度変化や冷却ガスの冷熱等により凍結融解作用を受けるため、周辺地盤と複雑な相互作用を発生し、予期せぬ沈下や上昇による被害が生じている。こうした問題を解決するため、アラスカの凍土地域において実物大のパイプラインを使った実験的研究が行われており、極めて顕著なパイプラインの変状が観測されている。本研究は、このような地域に埋設されるパイプラインの計画・設計において必要とされる挙動評価技術の確立を目的に、実物大実験で得られたデータをもとにして、その挙動変化を見るときともに、凍土とパイプラインの相互作用の評価方法について考えるものである。

Key Words : chilled gas pipeline, deformation, heaving, behavior, permafrost, non-permafrost

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中、日本を含む東アジア地域への天然ガスの安定需給を考えると、その供給地域の分散化は極めて重要である。特に天然ガスの存賦地域は北方圏域に集中しており、これらの地域からのパイプライン整備は急務である。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、地表部付近の地盤(活動層)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などにより、周辺地盤との複雑な相互作用が発生し、予期せぬ沈下や上昇による被害が生じている^{1), 2)}。こうした問題を解決し、適切な構造設計を行うためには、パイプラインと凍土との相互作用を適切に評価することが不可欠となる。しかし、この現象は極めて多くの因子が介在する複雑な問題であるため、これまで様々な研究がなされているものの、評価手法が確立されているとは言いがたい。本研究は、このような地域に埋設されるパイプラインの計画・設計において必要とされる挙動評価技術の確立を目的に、凍土とパイプラインの相互作用の評価方法を提案するものである。なお、本論文においては、

Williams³⁾の定義における永久凍土地帯(Permafrost Zone)の内、主に不連続永久凍土地帯(Discontinuous Permafrost Zone)に埋設された冷却ガスパイプラインを対象としており、凍土部分と未凍土部分を区別するため、後者を英語の対訳である非永久凍土部(Non-Permafrost)と呼称することとする。

このような問題において、特に定量的な評価を困難にしている要素としては、凍結時の移動水分量の予測と凍上量の推定、クリープ等地盤の弾塑性的挙動の評価が挙げられる。Razaqpur and Wang⁴⁾は、Clapeyron式に基づく凍結面での水圧とダルシー則から移動水分量を推定し凍上量を予測している。しかし、凍結に伴って変化する透水係数を評価しなければならないため、透水係数の温度依存性のみを考慮した簡易な実験式を適用しており、汎用性や信頼性には疑問が残る。また、地盤内の応力度算定には半無限弾性体を対象としたブーシネスク解を適用した上で、室内実験から得られた実験式によりクリープを評価するなど、実用性を意識するあまり単純な仮定や実験式が多く介在するため、適用性についての十分な検証が必要と考えられる。なお、パイプラインのモデル化には弾性床土ばりモデルを適用し、有限要素解析により変形と応力度を算出している。

一方, Selvadurai^①らは, 凍上量の推定に必要な移動水分量は Razaqpur^②らと同様, Clausius-Clapeyron 式に基づいているが, クリープ変形を含めた地盤とパイプラインの応力計算には三次元 FEM を適用している。その結果, 様々な因子が考慮された包括的な評価手法と言えるが, 解析に多くのパラメータを必要とする上, 計算負荷が大きいため実用的とは言にくい。

本研究では, パイプラインを弾性床土上りとしてモデル化し, 非永久凍土部での凍上量と等価凍上力を与えることで, その変形と応力度の予測を行っている。この等価凍上力は, 弾性床土上りモデルにおいてパイプラインに作用させる分布荷重のことであり, 凍結進行面で実際に作用する凍上圧力とは異なるものの, パイプラインの変形をモデル上再現するために「等価」と考えられる荷重である。非永久凍土部の凍上量の予測と等価凍上力の推定にあたっては, パイプライン軸直角方向断面における二次元非定常熱伝導解析を適用し, 時々刻々変化する凍結面位置を算定した。この結果は, 凍結面位置における地盤拘束圧から等価凍上力を推定するのに用いる他, 高志の式^{③,④}に適用して凍上量推定にも利用する。高志の式は, Clausius-Clapeyron 式のように熱力学的なメカニズムに基づいて移動水分量や凍結量を求める^⑤のではなく, 対象試料を使った実験で求められるいくつかのパラメータにこれらの影響を含めて評価しているため, 取扱いが簡単な上, 精度の良い凍上量予測ができることで知られている。これと同様の方法として, Konrad and Shen^⑥により提唱されている氷晶分離ポテンシャル (Segregation Potential) を用いた方法が挙げられるが, 凍上率を算定するために必要な凍土物性パラメータの試験方法が規定されていない。これに対し高志の式は, パラメータの設定に必要な試験方法も, 地盤工学会の凍上試験方法に規定されており^⑦, より客観的な凍土物性の評価が可能なことから, 簡易設計手法への導入に優れていると考えた。

なお, クリープによる地盤の変形は基本的にパイプライン内の発生応力度を緩和する方向に作用するものであり, 設計上最も重要な「応力面での安全性」確保にとっては危険因子とならないのが一般的である。このため, 本研究の適用範囲を, クリープの影響が小さいと思われる凍上初期に限定し, 本研究では見込まないこととした。

本研究によるパイプラインの挙動ならびに応力度評価結果は, アラスカにおいて実施された実物大実験結果と比較を行い, その整合性を確認することとした。

2. 原位置試験の概要

永久凍土と非永久凍土にまたがって冷却ガスパイプ

ラインを設置した場合, 非永久凍土側で冷却ガスパイプラインの冷熱による凍上現象が発生するため, パイプラインが持ち上げられることになる。その結果, 特に永久凍土と非永久凍土の境界付近において大きな曲げ変形が発生し, 破損につながる恐れがある。このような現象を再現するため, アラスカ州フェアバンクスにおいて実物大規模の原位置実験が行われた^⑩。

(1) 実験概要

永久凍土と非永久凍土の境界面を事前の土質調査により検出し, この境界面を貫くようにパイプラインを埋設した。埋設時の断面図を図-1に示す。

埋設したパイプラインは, 直径 914mm, 肉厚 9mm の鋼管で, 永久凍土部は非凍上性の砂質土で埋め戻しを行った。一方非永久凍土部は, 埋設時の不陸を排除するため基礎部分 (Compacted Sand Bedding: 厚さ 1~3cm 程度) とパイプ基礎部 (Water-bound Sand: 厚さ 30cm) にのみ非凍上性の砂質土を投入し, 他は現地発生土で埋め戻しを行うことにより, 原状に近い状態に復旧した。

パイプラインの縦断方向断面図は図-2に示す通りである。パイプには-10.0℃の空気を循環させるようにして非永久凍土部で凍上を促進させ, パイプラインの鉛直方向変位をパイプライン上に設けられた Heave Rod により計測した。図中に示した上向き方向の矢印は Heave Rod の設置点を示しており, 特に大きな曲げ変形が発生する境界部付近で密な配置となるようにしている。また, パイプライン軸に沿った数点で, パイプライン軸直角方向平面断面内の地中に温度計を埋設し, 地盤内温度分布も計測している。

本実験は 1999 年末に開始され, 現在はパイプラインに暖気を送ることにより融解実験を実施している。本研究では冷却開始後, パイプラインに大きな凍上変位が計測された 2001 年 5 月までのおよそ 1 年半のデータに基づいて検討を行っている。

図-1 原位置試験 埋設断面図

図-2 原位置試験 縦断面図

(2) 外気温変動とパイプ冷却温度

外気温変動とパイプの冷却温度は、実験中の凍上作用を支配する最も重要なパラメータである。現地では、午前8時と午後8時の2回づつ温度計測を実施している。計測機器の不調による部分的な欠測期間もあるものの、1週間毎の平均温度をとり、時間的な変動を示すと図-3の通りとなる。外気温については年平均温度 0℃、温度振幅 20℃でほぼ変化しており、図中に示した正弦変動 (Sinusoidal) で評価できるものとする。一方パイプの温度は、実験開始当初の数ヶ月間、冷気を循環させるコンプレッサの安定性や外気温の影響を受け、やや不規則な変動を示しているが、冷却開始後 150 日位から 400 日位まで比較的安定して推移しており、平均すると目標温度 -10℃よりやや高い値となっている。

(3) 凍上変位測定結果

パイプラインの凍上変位は、パイプ直上に設けられた Heave Rod 先端のレベル計測で求めた。このため、パイプライン内部温度や外気温のように自動計測ができない上、積雪などの気象の影響も受けやすい。冷却開始約 9 ヶ月後の 2000 年 8 月末 (冷却開始後 262 日目) と 11 ヶ月後の 2000 年 11 月 (冷却開始後 343 日目) にレベル計測を行ったところ、顕著な凍上変位が認められたため、それ以降は 2週間毎を目安に計測を実施した。本論文では、パイプラインの凍上変位を見る際、1ヶ月毎を原則とした表-1 の 8 つの時間断面を主として取り上げることとし、グラフの中などでより細かい変動を見る場合のみ、2週間毎のデータも参照することとする。図-4 は、パイプラインの設計上支配的となる曲げ変形が発生する永久凍土と非永久凍土の境界部付近での凍上変位をグラフにしたものである。

図-4 から明らかなように、時間の経過とともにパイプラインの変形が進んでいく様子がわかる。パイプラインの設計上特に重要なのは、フロストバルブと呼ばれるパイプライン周辺に形成される球根上の凍結部が成長していく段階であり、その成長が概ね収束すると、クリープなどの影響によりパイプラインに発生する応力度は緩和の方向に向かっていくと考えられる。本研究で取り上げている冷却開始後の約 1 年半は、フロストバルブの成長過程と考えられる。

図-3 外気温・パイプ温度の時間変動

3. 弾性床土ばりモデル

パイプラインの変形と応力度を評価するため、弾性床土ばりモデルを適用した。地中に埋設されたパイプラインを弾性床土ばりにモデル化することは、Ladanyi¹⁰⁾をはじめ、Razaqpur and Wang⁹⁾等多くの研究に見られる。本研究では、周辺地盤から受ける圧力 (永久凍土部: q_1 , 非永久凍土部: q_2) と地盤バネに関わる特性長 $1/\lambda$, ならびに永久凍土と非永久凍土の境界面位置 l をパラメータとするモデルを導入した。なお、Razaqpur らはそのモデル化において、非永久凍土側での地盤圧力が一定ではなく、境界部付近で地盤から受ける圧力が大きくなるモデルを提案しているが、永久凍土との境界面位置を厳密に定義することが困難である上、時間的にも変動する可能性もあることから、本研究では地盤から受ける圧力分布は当該部分で一定と仮定した。境界面の位置を原点とし、パイプラインの軸方向 x に沿ったたわみを w とすると、支配方程式は式(1)の通りとなる (図-5 参照)。

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + k_s w = q \quad (1)$$

ここで、 EI はパイプラインの曲げ剛性、 k_s は地盤のバネ係数、 q は地盤から受ける分布荷重である。

なお、地盤から受ける分布荷重 q は、添字 1 および 2 を付けることにより、永久凍土部に作用する荷重と非永久凍土部に作用する荷重とに分けて扱っている。これに両端部での境界条件ならびに境界面での連続条件を適用することにより、永久凍土部および非永久凍土部における変位は式(2)および式(3)のように表される。

表-1 検討対象時間断面

No.	日付	冷却開始後日数	概算月数
1	2000/08/29	262 days	9 ヶ月
2	2000/11/18	343 days	11 ヶ月
3	2000/12/22	377 days	12 ヶ月
4	2001/01/19	405 days	13 ヶ月
5	2001/02/16	433 days	14 ヶ月
6	2001/03/15	460 days	15 ヶ月
7	2001/04/12	488 days	16 ヶ月
8	2001/05/11	517 days	17 ヶ月

図-4 パイプライン凍上変位の時間的変化

図-5 弾性床上りモデル

永久凍土部:

$$w_1(x) = \frac{-q_1 + q_2}{2q_2} \delta \quad (2)$$

$$\left[e^{\lambda x} \cos \lambda x + e^{-\lambda(x+2l)} \{ A_{sn} \cos \lambda x - A_{cs} \sin \lambda x \} \right] + \frac{q_1}{q_2} \delta$$

非永久凍土部

$$w_2(x) = \frac{-q_1 + q_2}{2q_2} \delta e^{-\lambda(x+2l)} \quad (3)$$

$$\left[\left(A_{sn} - e^{\frac{2}{\lambda}} \right) \cos \lambda x - A_{cs} \sin \lambda x \right] + \delta$$

式(2)および式(3)中の係数 A_{sn} ならびに A_{cs} は次式で与えられる定数である。

$$A_{sn} = 1 - \sin 2l\lambda, \quad A_{cs} = 1 - \cos 2l\lambda$$

ここに、 l は永久凍土側端部から境界面までの距離、 δ は境界面から十分に遠い位置における非永久凍土部（非永久凍土部一般部）でのパイプラインの凍上量、 $1/\lambda$ は式(4)で求められる特性長である。

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_s}{4EI}} \quad (4)$$

このモデルにおいてパイプライン変位量 δ は、非永久凍土の端部における変位量を表しており、実験により計測された値を用いることとした。こうすることにより、特性長 $1/\lambda$ に含まれる地盤のバネ係数 k_s は、周辺地盤から受ける分布荷重の関数として式(5)で表される。すなわち、

$$k_s = \frac{q_2}{\delta} \quad (5)$$

また、境界面位置 l はほとんど変化しないことが確認されているため¹²⁾、残るパラメータである分布荷重（永久凍土部： q_1 、非永久凍土部： q_2 ）について、実験において観測された変形データとの最小自乗法によるフィッティングを行い、最尤値を求めた。結果を図-6に示す。

図-6 計測結果に基づくパラメータ最尤値

図-7 フィッティングによるパイプラインの変形

図-6 より、永久凍土側に作用している圧力 q_1 は、非永久凍土側に作用している圧力 q_2 よりも格段に小さく、時間的な変動も比較的小さい。これは、永久凍土内においては、新たな凍結の進行が発生しないことによるものと思われる。これに対し非永久凍土側では、時間の進展にあわせて凍結が進行するため、地盤からの分布荷重が増加し、450 日を過ぎたあたりから収束傾向にあることが分かる。この地盤からの圧力は、パイプラインに当該変形をもたらすために必要な力であり、以降「等価凍上力」と称することとする。図-6 に基づいて求めたパイプラインの変形と実際に計測された変位との比較を図-7に示す。この図より、用いたパラメータが少ないにも関わらず、計測された変位が比較的精度よくフィッティングされていることが分かる。したがって、パイプラインの変位や曲げ応力度を推定するためには、非永久凍土一般部における凍上量 (δ) と等価凍上力 (q_2) の推定が重要であると考えられる。

4. 二次元非定常熱伝導解析

フロストバルブの成長によるパイプラインの凍上量と等価凍上力を推定するため、非永久凍土部一般部における二次元非定常熱伝導解析を行った。これにより、パイプ直下に形成されるフロストバルブの成長が求められるとともに、凍結面位置での地盤拘束圧力も推定可能となる。

地盤を均質かつ等方性の材料であると仮定した時の、

潜熱を考慮した非定常熱伝導問題の支配方程式は式(6)のようになる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{Q} \quad (6)$$

ここで、

T : 温度, ρc : 熱容量, λ : 熱伝導率, $\dot{Q}$: 潜熱

本解析では、地盤を等分割に分割し、空間方向には中央差分近似、時間方向には前進差分近似を導入して解析を行うこととした。また、潜熱の影響は等価比熱法¹³⁾により評価することとした。等価比熱法は、水から氷への相変化時の潜熱を、見かけの熱容量の増加により評価するものであり、その概念図を図-8に示す。図中の網掛け部分の面積が、水の単位質量当りの潜熱に等しくなるよう、液相限界と固相限界の間の熱容量を高めている。

地盤内の温度分布は、パイプラインの冷却作用を受けない場合でも、外気の変動の影響を受けることになる。解析に先立って一次元の非定常熱伝導解析を行い、地盤内温度分布の季節的影響を調査した。その結果、地表面の温度変化の影響は地下数mまでであることが確認されたため、解析対象領域は深度方向に10m、水平方向に20mとし、全体を20cmピッチで離散化した。その他、解析に用いた主な計算条件を表-2に示す。

なお、冷却開始後150日程度までの間は冷却装置の不調もありパイプ内温度の変動が見られるが、今回解析対象としている9ヶ月目から17ヶ月目にかけての期間では冷却装置の動作安定性は比較的良好。しかし、当該期間中に計測されたパイプラインの平均温度は、目標値である-10.0℃よりも高い-8.6℃であったため、この値を用いることとした。

また、原位置実験においてもパイプライン軸方向に沿った数点で、軸直角方向断面内の地盤温度計測をしているため、境界面から最も離れた断面で計測された観測値から、凍結面の進行の様子が分かる。図-9は、凍結面位置を0℃の位置と仮定し、実測された凍結深度と温度解析の結果得られた凍結深度とを比較したものである。

図-8 等価比熱法による潜熱の評価

表-2 解析条件

領域サイズ	10m * 20m	地盤質量(1/m³)	1.9
離散化間隔	20 cm	空隙率	0.25
時間刻み	2 hrs.	地盤熱伝導係数	未凍結 0.9
平均気温	0℃	(W/mK)	凍結 1.2
気温年変動	±20℃	パイプ温度	-8.6℃

図-9 から明らかなように、解析結果は常に実測値よりもやや大きめの評価を与えているが、その差は冷却開始当初を除いてほぼ一定であり、凍結面が時間とともに下がっていく様子がほぼ的確に再現されている。実測値と解析結果に差が生じた原因としては、特に最初の2ヶ月程度、冷却用コンプレッサーが正確に作動しなかったことや、現地発生理戻土の温度管理や締固めにむらがあったことによると思われる。このため、冷却開始後50日程度は予定通りに凍結面が進行せず、その分、解析が大きい値を与える結果となっている。

また、この解析による地盤内の温度分布図と原位置実験において求められた観測値から推定した凍結面位置の比較の一例を図-10に示す。両者の比較より、解析結果がほぼ計測された分布を模擬していることが分かる。

5. 凍上量と等価凍上力の推定

(1) 凍上量

凍上量の推定には、式(7)に示す高志の式を適用した。

$$\xi = \xi_0 + \frac{100\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \quad (7)$$

ここに、

ξ : 凍上率 (%), σ : 拘束圧力 (kPa),

U : 凍結速度 (mm/hr)

また、 ξ_0 , σ_0 , U_0 はそれぞれの土質ごとに実験により求められる値であり、現地で採取した Fairbanks Silt を用いた室内凍上試験⁹⁾の結果から、次の値を用いている¹⁴⁾。

$\xi_0 = 2.5$ (%), $\sigma_0 = 0.8$ (kPa), $U_0 = 0.25$ (mm/hr.)

図-9 凍結面位置の変化

高志の式は、この実験的に得られる3つのパラメータがあれば、凍結速度と拘束圧力から移動水分量も含めた凍上率が計算できるため、実用性に優れている。凍上率とは、単位長さ当りの凍結方向伸張量であり、これに当該土層厚を乗じることで凍上量を求めることができる。

既述したように、二次元非定常熱伝導解析によりパイプ周辺に形成されるフロストバルブの成長過程が追えるため、凍結面の進行状況が把握できる。そこで、パイプライン直下におけるフロストバルブの凍結速度を熱伝導解析結果から求めるとともに、凍結面位置での土被圧を拘束圧力として凍上率を求めた。凍上量は、この凍上率に当該層厚を乗じ深度方向に加算することで求められる。このようにして求めた非永久凍土部一般部での凍上速度と凍上量の時間的変化を、図-11 および図-12 に示す。

凍上量について解析結果と実測値を比較してみると、全体的に解析結果の方が大きくなっているが、その差は時間が経つにつれて小さくなってきている。この原因として考えられるのは、以下の通りである。

- i) パイプ直下の埋戻しに用いた現地発生土が埋戻し時にすでに凍結していたこと
- ii) 冷却開始当初のパイプラインの温度が不安定で、プラス温度になった時期もあるなど、パイプ周辺で凍結融解を繰り返した可能性が考えられること

図-9 に示した凍結面位置の変化でも見られたように、実測における凍結面位置は、凍結開始当初から地表面下 2.2m 以深にあり、パイプの直下 0.2m 余りの層では新たな凍上が発生していないと考えられる。しかし、解析においては該当層厚分の凍上量が約 1.5cm と見込まれており、その解析の方が大きな凍上量を予測することになったと推定される。また、冷却当初の不安定な温度変化は、パイプ周辺での凍結融解は発生させたものの、凍結面を進行させるには至らず、結果として図-9 に示したように、冷却開始から 50 日程の間、凍結面が進行しなかったものと思われる。しかし、冷却温度が安定してからは、順調に凍結面が下方に進行し、凍上量の増加が見られ、解析結果との差異は小さくなっていることが分かる。

図-10 温度分布図（左：計測結果、右：解析結果）

図-11 パイプライン直下での凍結速度の時間的変化

図-12 推定凍上量の時間的変化

(2) 等価凍上力

本研究で定義した等価凍上力とは、弾性床土上りモデルにおいて非永久凍土部に作用している上向き力であり、パイプラインに変形をもたらすために必要と考えられる便宜的な値である。既述したように永久凍土側では新たな凍結面の進行はないため、この等価凍上力 (q_1) はゼロとみなすことができる。一方、非永久凍土側ではパイプラインの冷却によりフロストバルブが成長し凍結面が地盤下方に進行していくため、等価凍上力 (q_2) が発生する。ここで、非永久凍土中のパイプラインに沿ったフロストバルブの形状について考えてみる。フロストバルブの成長過程が式(7)で与えられる高志の式に従うとすれば、その形状は拘束圧力と凍結速度に依存することになる。パイプラインは、永久凍土による拘束を受ける境界面付近から非永久凍土一般部に向けてその凍上変位量を増していくが、パイプラインの凍上量自体は最大でも0.15m以下であり、凍結面の深さ (0~2m超) に比べてその大きさは小さい。このため、凍結面深さにおける地盤の拘束圧力はほぼ一定とみなすことができる。また、凍結面の進行速度も非永久凍土部のパイプラインに沿って一定であることを考慮すれば、フロストバルブの成長の仕方は非永久凍土側で不変と仮定でき、非永久凍土側の等価凍上力 (q_2) も一定とした。これを弾性床土上りモデルに適用した時のパイプラインに沿った圧力分布は図-13 のようになる。永久凍土と非永久凍土との境界面から離れた非永久凍土一般部では、本章「(1) 凍上量」で求めた凍上量が発生するよう、等価凍上力 (q_2) に応じた地盤のバネ係数を採用することで、上向きの等価凍上力と地盤バネによる下向きの力とはつりあうこととなる。

図-13 パイプラインに作用する荷重

しかし、境界面付近では、パイプラインの変形に応じた地盤反力を受けた結果、非永久凍土側で上向き、永久凍土側で下向きの分布荷重が発生し、これが境界面付近の変形を生み出していると考えた。

次に、等価凍上力 (q_2) の大きさについて考える。パイプラインの埋設が完了した状態では、その周囲にフロストバルブは形成されておらず、パイプライン軸レベルにおける下向きの荷重はその土被圧に等しく、同時に等しい大きさの上向き地盤反力を受けてパイプラインは安定 (静止) している。しかし、非永久凍土部でフロストバルブの形成が進み、パイプライン軸レベルより下方 h のところまで凍結面が進行した場合を考えると、フロストバルブとパイプラインは凍結により一体として挙動すると考えられることから、凍結部分の土重量がパイプラインには付加されることになる。したがって、パイプラインが静的な平衡状態を打ち破って凍上するためには、少なくとも凍結部分の土重量 (γh , γ : 土の単位体積重量) に相当する上向き力の作用が必要と考えられる。

本研究では、これを等価凍上力と仮定し、図-14 のように定義した。なお、これまでの凍上に関する研究成果から、凍結面におけるアイスレンズの圧力は、その位置における拘束圧力に等しいことが広く知られており、等価凍上力の定義は、凍結面に作用する地盤の拘束圧力とパイプライン埋設深さにおける土被圧との差と言うこともできる。そこで、既述の二次元非定常熱伝導解析の結果に基づいて時間的に変化する凍結面位置を求め、等価凍上力を算出した。ただし、等価凍上力はパイプラインの単位長さ当りに作用する力であるため、この圧力差にパイプの外径 (D) を乗じている。このようにして求めた等価凍上力の推定結果を図-15 に示す。図中には、原位置で計測された変位データに基づく等価凍上力のフィッティング結果も合わせて示しているが、比較的良く一致していることが分かる。

図-14 等価凍上力

図-15 等価凍上力の比較

6. パイプラインの変形と応力度の予測

3 節において示したように、弾性床上ばりでモデル化したパイプラインの変形は、非永久凍土部一般部における凍上量 δ と、等価凍上力 q_0 が与えられれば、かなり良い精度で予測できると思われる。そこで、4 節で示した二次元非定常熱伝導解析を用いて、5 節の方法により凍上量 δ と等価凍上力 q_0 を求め、パイプラインの変形と曲げ応力度の時間的変化を推定した。なお、永久凍土側の地盤圧力 q_1 については、フィッティング結果に見られるようにその値がほとんどゼロに近い上、既に凍結している部分での新たな凍上による圧力はないものと考えられるため、ゼロと仮定した。結果を図-16 に示す。また、実測値からフィッティングして求めた曲げ応力度分布図と、解析により予測した曲げ応力度分布図の比較も図-17 に示す。

既述したように、本解析で求めた凍上量は計測値よりも大きめに評価しており、図-16 に示す時間変動の点では、冷却開始後の日数が浅い部分でややその差が大きいと言える。特に、冷却装置の不調などで凍上が予想通りに進まなかった初期段階での差は 30% 程度と大きい。しかし、地盤内での凍結が進むにつれ両者の差は縮小していき、凍上量の予測が実測値に近づいてくる 433 日目以降では、極めて良い整合性を見せている。ここで重要なことは、この予測応力度が二次元熱伝導解析と高志の式のみによる簡易なモデルにより求められたものであり、凍上の実測値に基づいてフィッティングから推定した曲げ応力度と、かなり良い精度でその変形や応力度が再現されていることである。

なお、このモデルでは、フロストバルブ側方にある土塊がもたらす抵抗力は見込んでいない。代表的なものは、フロストバルブと周辺土塊との間のせん断力等であるが、このような力は土塊間の相対変位の発生を前提にした考え方であるのに対し、本研究で取り上げている現象では、これに対応するような明瞭なせん断面の発生は見られず、クリープも含めた連続的なひずみの増加をもたらすものとする。したがって、パイプラインの凍上量は、凍上力と抵抗力といった力のつりあいよりも、アイスレンズの形成と成長に起因する強制変位により規定されると考えたことによる。

実際にこのような構造物を設計する場合、与えられた地盤条件のもとで、パイプラインの断面剛性をどの程度に設定するのかは、安全性の確保のみならず、経済性向上の面でも極めて重要な事項である。特に凍上変形によりパイプラインに発生する曲げ応力度は設計上支配的となる因子であり、その大きさや分布、最大値の発生箇所を事前に推定することは最大の課題と言える。本方法によれば、熱伝導解析に必要な物性試験と、高志の式に用

図-16 発生最大曲げ応力度の比較

いられるパラメータ決定に関わる試験を、当該地盤試料を使って行うことで、実用上十分な精度の推定が可能であることを示唆しており、極めて実用的な評価方法になりうるものとする。

7. まとめ

本研究では、実務設計における実用性を考慮して、パイプライン挙動は弾性床上ばりモデルで、また凍上量や凍上圧力の推定には二次元非定常熱伝導モデルと高志の式を組み合わせることで導入することにより、簡易な挙動推定方法を提案している。この結果は、原位置実大試験結果との比較でも妥当な予測結果を与えており、凍土地盤中に埋設された線状構造物の挙動評価手法として期待できる。本研究の研究成果をまとめると次のようになる。

- 弾性床上ばりモデルに用いられる地盤のパネ係数や作用荷重強度は、その大きさや分布形状も含めれば複雑な組合せが考えられるが、本研究で示したように、非永久凍土部一般部における凍上変位と、非永久凍土部において一定と考えた等価凍上力だけでも、パイプラインの変形と応力度は比較的良好な精度で模擬できる。
- 地盤内の凍結面の進行を把握するための二次元非定常熱伝導解析と、凍上量を推定する高志の式を組み合わせることで適用することにより、挙動評価手法の簡素化が可能となった。すなわち、凍上量を支配する重要因子の一つである移動水分量や透水係数の変化などは高志の式で一括して評価するため、解析は潜熱のみを考慮した非定常熱伝導問題に帰着する。このようにして求めたパイプラインの変形と応力度の推定結果は、実測値に近い結果となった。

本手法を、凍土中に埋設されたパイプラインの設計手法として確立するためには、さらに多くの実験結果との整合性を調査しその適用性を検証する必要がある。また、長期的なパイプラインの挙動予測に適用するためにはクリープの影響評価や凍結融解作用の繰り返しによる凍上量予測等についても今後検討を行う必要があると考える。

図-17 境界面付近の曲げ応力度

参考文献

- 1) York, G. : "Russians are losers in Arctic oil gamble", pp.A1-A12, Vol.9, The Globe and Mail, Toronto, 1994.
- 2) Williams, P. J. : "Pipelines & Permafrost", Science in a Cold Climate, Carleton University Press Inc. pp.62-77, 1986.
- 3) Razaqpur, A.G and Wang, D. : "Frost-induced Deformations and Stress in Pipelines, International Journal of Pres. Ves. And Piping, Vol. 69, pp.105-118, 1996.
- 4) Selvadurai, A.P.S., Hu, J. and Konuk, I. : "Computational Modeling of Frost Heave induced Soil-pipeline Interaction I. Modelling of Frost Heave", pp.215-228, Vol. 29, Cold Regions Science and Technology, Elsevier Science B. V., 1999.
- 5) 高志勤, 益田稔, 山本英夫 : 土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度, 有効応力の影響に関する研究, 日本雪氷学会誌「雪氷」, Vol.36-2, pp.1-20, 1974.
- 6) 山本英夫, 生瀬孝博, 伊豆田久雄 : 圧密応力の異なる土の凍結膨張に関する実験的研究, 日本雪氷学会誌「雪氷」, Vol.51-4, pp.275-284, 1989.
- 7) Henry, K.S. : A Review of the Thermo-dynamics of Frost Heave, Technical Report, ERDC/CRREL TR-00-16, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, US Army Corps of Engineers, pp.1-19, 2000.
- 8) Konrad, J.M. and Shen, M. : 2-D Frost Action Modeling Using the Segregation Potential, Cold Regions Science and Technology, Elsevier, pp. 263-278, 1996.
- 9) 社団法人地盤工学会 : 凍上量予測のための土の凍上試験方法 (JGS0171-2003) , 地盤工学会基準・同解説 VII, 2003.
- 10) Huang, S. L., Bray, M. T., Akagawa, S. and Fukuda, M. : Field Investigation of Soil Heave by a Large Diameter Chilled Gas Pipeline Experiment, Fairbanks, Alaska, Journal of Cold Regions Engineering, ASCE, Vol. 18, No.1, pp.2-34, 2004.
- 11) Ladanyi, B. and Lemaire, G. : Caen Pipeline Experiment: A Back-Analysis of Observations Made during the First Year of the Test, Pipelines and Frost Heave, Proc. of seminar at Caen, France, pp.39-42, 1986.
- 12) 福富隆史, 蟹江俊仁 : チルドガスパイプラインの凍上挙動評価モデルの検討, 平成 14 年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 59, pp. 530-531, 2003.
- 13) 大中逸雄 : コンピュータ伝熱・凝固解析入門, pp.167-207, 丸善株式会社, 1985.
- 14) 金高義, 赤川敏 : 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, 平成 14 年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 59, pp.526-529, 2003.

(2005. 2. 21 受付)

HEAVING BEHAVIOR AND ITS EVALUATION METHOD OF CHILLED GAS PIPELINE BURIED IN FROST SOIL

Shunji KANIE, Satoshi AKAGAWA, Takashi MIKAMI, Motohiro SATO
and Ko Ui KIM

Chilled gas pipeline buried through a boundary between permafrost and non-permafrost is frequently subjected to severe damage due to deformation since repetition of freeze and thaw in surrounding soil exerts frost heaving and settlement on the pipeline. The authors have been conducting real scale experiment in Fairbanks, Alaska and those phenomenon was observed. In order to establish an evaluation and design method for chilled gas pipeline, this study aims to relate the observed deformation with those by a simple model based on a beam on elastic foundation. The frost heave and the equivalent frost pressure assumed in the model are evaluated with Takashi's equation and two dimensional temperature distribution analysis. As a result, it is found that the proposed method estimates the deformation and the stress of pipeline adequately for design.