

凍結砂を充填した高靱性パイプインパイプの 力学的挙動解析及び曲げ変形メカニズムに関する検討

Mechanical analysis and mechanism of bending behavior for flexible Pipe-in-pipe filled with Frozen sand

北海道大学大学院工学院	○学生員	林 昌宏	(Akihiro Hayashi)
北海道大学大学院工学院	学生員	寺田 豊	(Yutaka Terada)
北海道大学工学部環境社会工学科	学生員	伊原 かすみ	(Kasumi Ihara)
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	蟹江 俊仁	(Shunji Kanie)

1. はじめに

地盤変動が多発する地帯や断層地帯、あるいは不連続永久凍土地帯にパイプラインを埋設する場合、地盤の残留変位や凍上により大きな曲げ変形を受けることが知られている。このような自然条件下において、脆性的な破壊を避け、フレキシブルな曲げ変形を実現するパイプラインが古くから求められてきた。こうした技術的要求に応え、応力をパイプ全体で効果的に受け持ち、材料の靱性を活かした曲げ変形が期待される、可塑性材料充填パイプインパイプ（以下、PIP と称す）の開発に着手した。

中空のパイプに作用する曲げモーメントを増加していくと、パイプはその断面形状を楕円化し、やがて局所的に折れるような、**Brazier Effect** と呼ばれる破壊現象を引き起こすことが知られている。このような局所的な破壊が起こると、材料は靱性を活かしきれずに破壊に至る。これに対し、本研究で考える PIP は、図-1 のような断面構成を有し、内管と外管との間に可塑性材を中詰めることで断面変形の防止を試みるものである。

筆者らの実験から、中詰材として凍結砂を用いた PIP が非常に高い曲げ変形性能を有することが確認されている。そこで、その曲げ変形メカニズムを明らかにすることを目的として、シンプルなビーム理論から力学的解析を行い、塑性変形領域も含めた曲げ変形特性の評価に対する検討を行うものである。

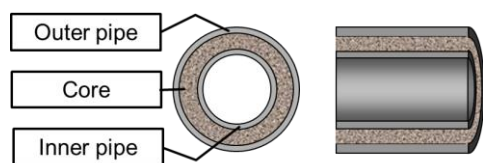


図-1 可塑性材充填パイプインパイプ構造

2. 実験概要

本実験では、図-2 に示すような 4 点載荷実験装置を用いた。実験装置の支点間距離は $d=900\text{mm}$ 、載荷点間距離は $L=120\text{mm}$ 、支点載荷点間距離は $d=390\text{mm}$ 、変位計間距離は $l=50\text{mm}$ である。また、3 種類の載荷速度、0.23, 2.5, 5.0(mm/min)を設定し、パイプに荷重を加える。パイプに加わる曲げモーメントはロードセルによって測定した荷重の値から換算し、曲率は 3 点に設置したひずみゲージと変位計から得られた値より算出した。ロードセルの荷重が減少傾向に転じた段階、あるいはパイ

プが破壊した段階で実験を終了とした。

アルミニウムパイプを使用し、管厚 1mm の外管(外径 $d=50\text{mm}$)と 3 パターンの内管(外径 $d=20, 30, 40\text{mm}$)の組み合わせで PIP($\phi 20, \phi 30, \phi 40$)を作製し、中詰材には豊浦標準砂を用いた凍結砂を採用した。

PIP 供試体の製作手順は以下の通りである。①パイプの端にエンドキャップ(図-3)を装着し内管と外管の中心を一致させる。②砂の充填時に外管をハンマーで叩くことによって、密度 1.60g/cm^3 前後の高い締固度を確保する。③砂充填後、蒸留水を注入し、凍結を行う。凍結方法は、 -10°C の不凍水をパイプ内管に約 24 時間循環させパイプを同心円状に凍結させて断面を一樣に凍結させた後、パイプ全体の温度を均質にするため -10°C の低温室内にて約 24 時間かけて凍結を行うというものである。



図-2 4点載荷実験装置



図-3 エンドキャップ

3. 実験結果・考察

凍結砂充填 PIP の曲げ試験から $M-C$ 関係を求めた。図-4 にひずみゲージの読み値から算出した曲率を、図-5 には変位計の読み値から算出した曲率を示す。両結果において、全ての凍結砂充填 PIP が中空及び砂詰単管よりも大きな限界曲率の値を示している。また、図-5 を見ると、図-4 とは違い、 $\phi 20$ が $\phi 30$ よりも大きな限界曲率の値を示している。これは $\phi 20$ のひずみゲージが途中で剥がれ、実際に $\phi 20$ が発揮した靱性が図-4 に反映されていないためである。この結果から、曲げに対する PIP の靱性は凍結砂の充填量に比例して向上すると推測した。

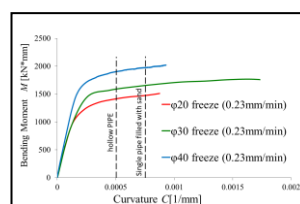


図-4 管径別 $M-C$ 比較
(ひずみゲージより)

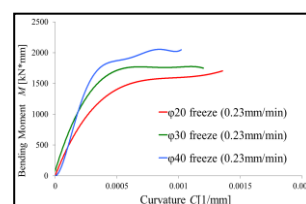


図-5 管径別 $M-C$ 比較
(変位計より)

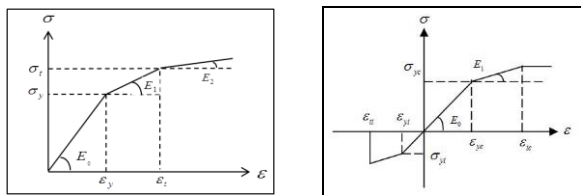
4. 凍結砂充填 PIP の力学的解析

この力学的解析の目的は、凍結砂充填 PIP の曲げ変形挙動のモデル化にある。筆者らは、本研究に先んじて、軸方向に応力を伝えるモルタル充填単管パイプの力学的解析手法を提案しており、その研究を元に凍結砂充填 PIP の数値解析モデルを構築した。ただし、その強度がひずみ速度に依存する可能性が考えられる凍結砂については、モデルの簡略化を目的に、今回はその効果を考慮していない。

4.1 応力-ひずみモデルの算定

筆者らの既往の研究により、中空単管パイプの曲げ試験から、管に用いたアルミニウムの応力-ひずみモデル(図-6(a))を tri-linear 型と定義して、その諸元を求めた。

凍結砂の応力-ひずみ関係は上田ら¹⁾の研究による、砂質凍土における応力ひずみ曲線モデルを参考にしてモデル化を試みた。また、凍土の引張側の材料特性は、赤川ら²⁾の研究で明らかにされている引張強度を参考にし、圧縮の 0.1 倍としてモデルを仮定した。



(a)アルミニウム

(b)凍結砂

図-6 応力-ひずみモデル

4.2 数値解析モデルの構築

本解析には、軸方向に弾性域から塑性領域まで一貫して曲げ変形挙動を評価できる数値解析モデルが求められる。そこで図-7 に示すように、微小な面積を有するファイバー要素に分割し、離散化を施した。

また、凍土等、圧縮・引張で応力-ひずみ関係が大きく異なる脆性材料の材料特性から、引張側の破壊による中立軸の圧縮側への移動(図-8)が起これと推測される。そこで本研究では、凍結砂充填 PIP を一つの合成梁と捉え、式-1 に示すように圧縮合力・引張合力の力のつり合いを求めて中立軸を算出する。その中立軸から断面高さを定義し、式-2 を用いて曲げモーメントを算出した。

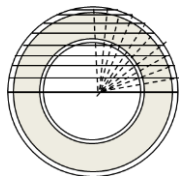


図-7 メッシング手法

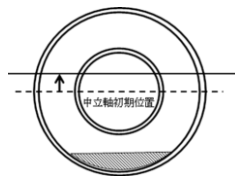


図-8 中立軸の移動

$$F_{outer} + F_{inner} + F_{core} = 0 \text{ (式-1)} \quad M = \sum \sigma_i (y_i - y_{lag}) A_i \text{ (式-2)}$$

4.3 解析結果

本解析では、脆性破壊を引き起こしにくいと考えられる最も遅い载荷速度 0.23 (mm/min) の実験結果と解析結果の比較を行う。図-9 から、各管径の解析結果において、それぞれ実験で得た曲げ変形を概ね再現しているこ

とが見て取れる。このことから、この数値解析モデルを凍結砂充填 PIP の解析に導入することの妥当性が確認できたと考えている。

尚、凍結砂のひずみ速度依存性を本解析では考慮していない。さらなる定量的な議論を進めるために、このパラメータの導入を今後の課題としたい。

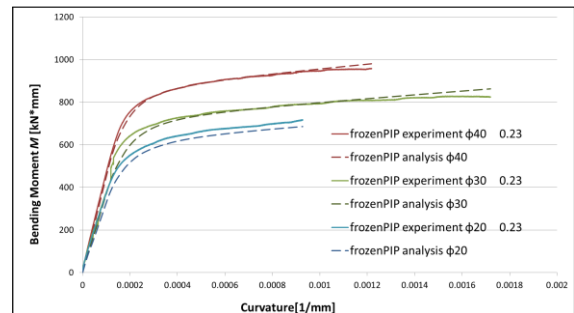


図-9 実験結果・解析結果 M-C 関係比較

5. 考察・まとめ

変位計から得た実験結果から、曲げに対する PIP の靱性が凍結砂の充填量に比例して向上することが推測され、さらに解析結果は、中立軸の移動量が中詰材の充填量に比例して増加することを示していた。この結果を受けて、凍結砂が PIP に高い曲げ変形性能を付与する理由を以下のように考察した。

- ①凍結砂引張側の破壊がパイプの中立軸を圧縮側に移動させ、外管に作用する圧縮ひずみを減少させる。
- ②パイプにかかる圧縮応力を凍結砂が負担し、外管に大きな圧縮力が作用することを抑制している。

本研究から、凍結砂充填 PIP の弾性域から塑性域に至る曲げ変形挙動を概ね再現することができた。さらに、力学的解析を通して、その高性能曲げ変形メカニズムの一端を明らかにすることができたと考えている。

6. 今後の展望

中空や砂詰の単管と比べ、凍結砂を充填した PIP の曲げ変形性能は大いに優れていると言えるが、一方で、中詰材の量が多ければ多いほど変形性能が上がるという側面をもっていると考えられる。これは曲げ変形性能を向上させればさせるほど、エネルギーの輸送効率が下がることを意味している。そこで今後は、中詰材や管の材料特性、管径などのパラメータから、可塑性材充填パイプインパイプに最適化をもたらす管と中詰材の力学的な相互関係を定量的に明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1)上田保司, 生頼孝博, 村田武: 凍土の変形係数に関する実験的検討, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.2, pp.577-589, 2007
- 2)Satoshi Akagawa, Kohei Nishisato: Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe, Cold regions science and technology, ELSEVIER, 2009
- 3)寺田豊, 蟹江俊仁, 佐藤太裕, 林昌宏: ファイバーモデルによるパイプインパイプの弾塑性挙動評価, 平成25年度 土木学会北海道支部論文報告集 第70号