

凍結砂充填単管パイプの曲げ変形特性評価

Comprehensive evaluation on bending behavior of pipe filled with frozen sand

北海道大学工学部環境社会工学科 ○ 学生員 柴田 野乃花 (Nonoka Shibata)
 北海道大学大学院工学院 学生員 伊原 かすみ (Kasumi Ihara)
 北海道大学大学院工学院 学生員 岩本 太一 (Taiti Iwamoto)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 蟹江 俊仁 (Shunji Kanie)

1. 研究の背景と目的

社会基盤施設の高度化・複雑化に加えて、残留ひずみが存在する断層地帯や大深度地下、そして極寒地域などといった過酷環境での開発ニーズは構造物に従前とは異なる性能を要求するようになってきている。さらに、近年では初期コストだけではなくメンテナンスコストに優れた構造材料や構造形式の開発が求められている。このような現状において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に対し、構造安定性の高く、かつ維持管理も容易なパイプラインが求められている。そこで筆者らは、二重管構造のパイプに中詰材を充填することで局所的な破壊を抑え、フレキシブルな曲げ変形を実現する中詰材充填パイプ(以下 PIP/図-1)の開発を進めてきた¹⁾(特許第 5262684 号)。

従来の曲げ実験ではひずみゲージを用いてパイプの曲げ変形挙動を示していたが、凍結砂充填パイプはしなやかに曲がることで我々の予想をはるかに超えた曲げ変形を実現したため挙動を最後まで追うことはできなかった。

そこで本研究では塑性域まで精度の高い評価が可能となっているデジタル画像処理による変形測定法(以下 画像処理法)を用いて凍結砂充填パイプの曲げ変形挙動を評価する。また、ひずみゲージから画像処理法に変更することによってパイプ軸方向において離散的でしか示せなかった評価を連続的に行えるようになった。

凍結砂を充填することで高い曲げ変形挙動を実現することは先に述べたとおりであるが、それに加え凍結砂には自己修復性能が期待されている。自己修復性能とは、応力が加わっている状態でも凍結砂を一度融解し再び凍結させることで応力が集中していた箇所の中詰材をなじませ応力を再配分する性能を指す。自己修復性能を生かすことでパイプラインへの実現化を図った際、維持管理が容易となる。こうした背景において、本研究ではまず凍結砂充填PIPの研究の基盤となる凍結砂充填単管パイプを曲げ、画像処理法を用い曲げ変形挙動を包括的に評価することを目的とする。

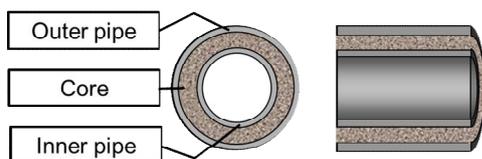


図-1 パイプインパイプ構造

2. デジタル画像処理による変形測定法

本研究での画像処理法はパイプに測定点としてシールを貼り付け、撮影したデジタル画像におけるそれぞれのシールの座標を画像の輝度分布より読み取り、曲線で補間することによりパイプの曲率を測定する手法である。画像処理ソフト ImageJ を用いて撮影したデジタル画像上にピクセル単位での座標(x,y)を設定する。その後すべてのシールの重心点の座標(x_p,y_p)を求める。得られた座標データをもとに式(1)に示した4次曲線で補間する。

$$y = a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x^2 + a_4x^1 + a_5 \quad (1)$$

本来曲げモーメントが一定であるならばひずみは2次曲線で表現することができるが、従来の研究結果から弾性域においてひずみを2次曲線で補間しきれないことが知られていた。そのため、本研究では4次曲線で補間することでより精度の高い曲線を表現した。

3. 凍結砂充填単管パイプ曲げ実験

(1) 実験方法および実験条件

本研究では一定区間でモーメントの最大値を発生させるため4点載荷試験を行った。構造条件、カメラの設定は以下の通りである。

表-1 構造条件

全長	載荷点間距離	支点載荷点間距離
900[mm]	120[mm]	390[mm]

表-2 カメラの設定

有効画素数	撮影間隔	撮影距離	画像サイズ
1010 万画素	10 秒	約 50[cm]	3888×2592[pixel]

ロードセルは中詰材のひずみ速度依存性を考慮し、最も現実に近い載荷速度 0.23[mm/min]とした。

曲げ実験は-7℃の低温実験室内で行い、M-C 関係を表すことにより曲げ変形挙動を評価した。曲げモーメント M はロードセルによる荷重から算出することで求める。曲率 C はパイプの軸方向の中央に 5[mm]間隔で直径 5[mm]の黒点のシールを 17 点貼り、画像処理によって算出する。

(2) 実験供試体

パイプの材質はアルミニウム合金であり、管径:50[mm]、管厚:1[mm]である。中詰材は豊浦標準砂を用い、砂をソフトハンマーで叩き締めながら中詰めする

ことで密度を約 1.6[g/cm]とした。パイプの片端径 2.5[mm]のドリルで穴を開け、垂直に立てた状態のパイプの下部から水を浸透させ、飽和度を約 100%にし、2℃の冷蔵室内で 24 時間水平に置いた後-7℃の低温実験室に 24 時間置き凍結させた。

4. パイプの曲げ実験結果と考察

凍結砂充填単管パイプは従来の研究の乾燥砂充填単管パイプのような圧縮側の局部座屈ではなく引張り側での破断により破壊した(図-2, 図-3)。



図-2 中空単管パイプの破壊形式と破壊点



図-3 凍結砂充填単管パイプの破壊形式と破壊点

図-4 に中空単管・乾燥砂充填単管・凍結砂充填単管の $M-C$ 関係の比較を示す。曲率 C はパイプ軸方向中央部分の点を用いた。中空単管に対して凍結砂充填単管の限界曲率は 3 倍以上にも達することから凍結砂充填単管が非常に高い曲げ変形性能を有することが確認できる。さらに、グラフの弾性域の挙動から中詰材として凍結砂を適用することでパイプの曲げ剛性向上に寄与しないことが読み取れる。

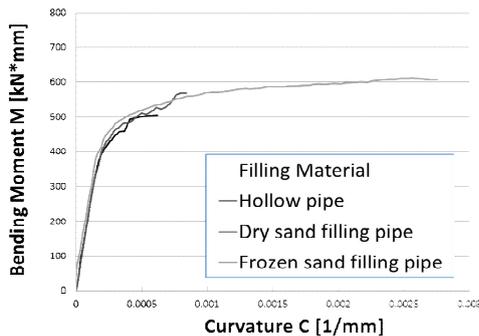


図-4 $M-C$ 関係の比較

図-5 に凍結砂充填単管パイプについての載荷開始後から破壊時にわたる、載荷点間の曲率分布の載荷点変位量 y [mm]における変化を 11.5[mm]ごとに示す。横軸はパイプ中心を 0 としたパイプ軸方向における[mm]単位の座標である。図-5 より弾性域(約 $y=20$ [mm]まで)ではパイプ軸方向で一様に曲率が上がるが、塑性域になると徐々にパイプ中央部付近の曲率が先行したまま進み、破断点においてはパイプと中詰材の間でモーメント再配分が起き、極端に分布図が変化することが確認できる。

図-6 に弾性域における特徴的な曲率分布の挙動を示す。弾性域では図-6 に示したように中央点付近で小さく、載荷点付近で大きな曲率の値を呈した後に、パイプ軸方向に一様に近い曲率を示すという挙動(以下 曲率の平準化)を複数回繰り返すことが確認できる。これは凍結砂充填パイプにのみ見受けられる事象である。中詰材を凍結させたことによりパイプと中詰材との合成構造となり、パイプと中詰材で曲げモーメントを分担して受け持つようになる。曲げ変形初期ではパイプ軸方向中央部付近で中詰材の曲げ応力の負担割合が大きいものの、さらに曲げ変形が進むことによって、凍着力に限界が生じ、パイプと中詰材との間ですべりが発生する。このような現象を繰り返すことで、曲率の平準化がもたらされるものと思われる。

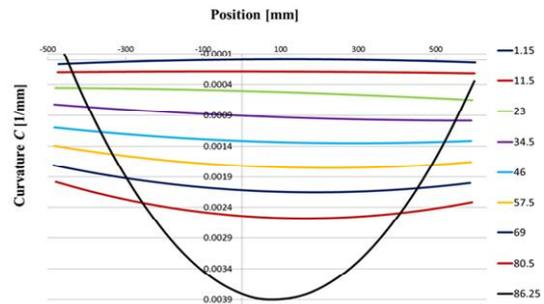


図-5 凍結砂充填単管曲率の変化

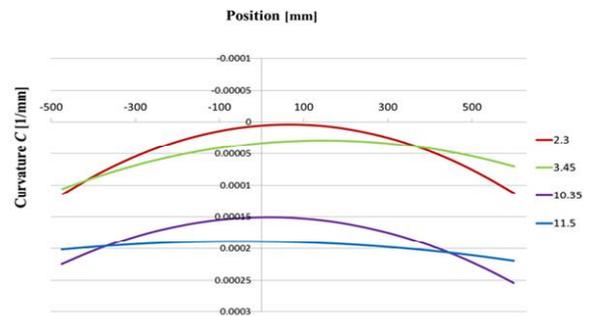


図-6 弾性域における曲げの平準化

5. まとめと今後の展望

本研究では中詰材として凍結砂を用いることで乾燥砂を用いた場合よりも高い靱性を発揮することが確認できた。また、従来の実験では評価できなかった凍結砂充填パイプ特有の曲げの平準化について確認ができた。今後の展望としては PIP でも同様に中詰材に凍結砂を適用した場合の効果の確認とともに、パイプ内の凍結砂の様子を解析することによって曲げの平準化として推測された要因が適当であるのか解明をしていきたい。

6. 参考文献

- 1) 蟹江俊仁, 佐藤太裕, 赤川敏, 田中俊哉: 埋設用二重管, 該埋設用二重管を有するパイプライン, 特許番号 5262684 号, 特許庁, 2013
- 2) 白石圭佑: 曲げを受けるフレキシブルパイプインパイプの挙動に関する実験的検討, 土木学会北海道支部論文集 第 66 号, A-33, 2010