

中詰材の材料特性に応じたパイプインパイプの数値解析モデルの構築と曲げ変形挙動の考察

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研究院 フェロー 蟹江 俊仁 (Shunji Kanie)
 北海道大学大学院工学院 学生員 寺田 豊 (Yutaka Terada)

1. はじめに

社会基盤施設の高度化・複雑化に加え、大深度地下や大水深域、さらには極寒地域といった過酷環境での開発のニーズが高まってきている。そこで、二重管構造の間にコア材という中詰材料を充填したパイプインパイプ（以下、PIP と称す）は中詰材料の材質に応じてさまざまな曲げ変形特性を示すことから、多様な環境条件下での適用可能な構造物として注目されている。筆者らは中詰材に乾燥砂を充填することにより、曲げ剛性向上への寄与は非常に小さいものの、Brazier Effect の発生を抑え、高いひずみ領域まで滑らかに変形するPIP の開発を進めてきた。さらに、中詰材の砂を水で飽和し凍結させた凍結砂充填 PIP は乾燥砂では期待できなかったパイプの曲げ剛性の向上と高いクリープ変形性能を期待されている。PIP の実用化のために、まずPIP の曲げ変形挙動を弾性域から塑性域まで一貫して評価できる数値解析モデルの構築が必要である。そこで本研究では数値解析モデルを用いて、中詰材の違いによるPIP の曲げ変形挙動の違いについて考察を行う。

2. 実験概要

本実験では、図-1 に示すような4点載荷実験装置を用いた。実験装置の支点載荷点間距離は $d=390$ [mm]、載荷点間距離は $L=120$ [mm]、変位計間距離は $l=50$ [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。パイプにアルミニウムパイプを使用し、管厚 1 [mm] の外管(外径 $d=50$ [mm])と3パターンの内管(外径 $d=20, 30, 40$ [mm])の組み合わせで乾燥砂充填 PIP(DBL-SD- $\phi 20, \text{DBL-SD-}\phi 30, \text{DBL-SD-}\phi 40$)と凍結砂充填 PIP(DBL-FS- $\phi 20, \text{DBL-FS-}\phi 30, \text{DBL-FS-}\phi 40$)

を作製した。中詰材には乾燥砂、凍結砂ともに豊浦標準砂を用いた。また、どちらも砂の密度が 1.60 [g/cm³] 前後になるように締め固めた。

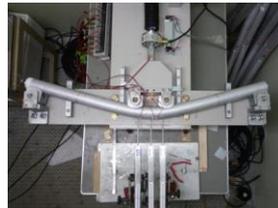


図-1 4点載荷実験装置



図-2 エンドキャップ

3. 実験結果・考察

図-4 は乾燥砂充填 PIP、図-5 は凍結砂充填 PIP の $M-C$ 関係を示している。また、図中の SGL-SDNo.1 は中空単管パイプの $M-C$ 関係である。実験結果より内管の直径が 40 [mm] の PIP が一番大きい限界曲げモーメント、曲率を示していることが分かる。このことから内管と外管の組み合わせ、すなわち中詰材の量によって限界曲げモーメント、曲率が決まってくると考えられる。

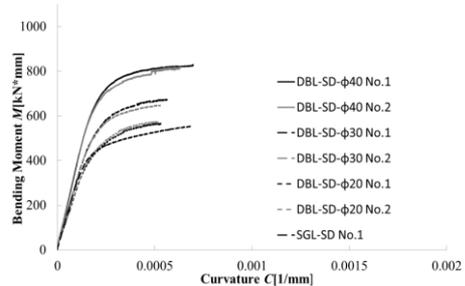


図-4 管径別 $M-C$ 比較 (乾燥砂)

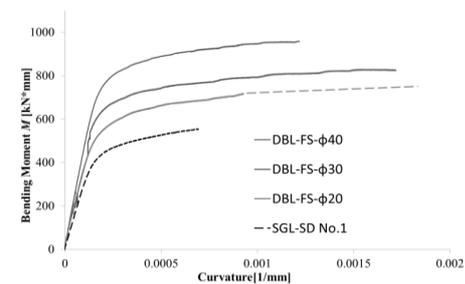


図-5 管径別 $M-C$ 比較 (凍結砂)

4. PIP の数値解析手法の構築と曲げ変形挙動の考察

4.1 ファイバーモデルの概要

本解析ではパイプの軸方向に弾性域から塑性域まで一貫して評価するためにファイバーモデルを導入した。

キーワード パイプインパイプ, ファイバーモデル, 弾塑性挙動評価, Winkler バネ, 応力-ひずみ関係

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学研究院 TEL 011-706-6177

Timoshenko 梁を採用し, shear locking 現象を防ぐため, 各軸方向の変位量, 回転角は 1 次関数で補完するものとした. 要素剛性マトリクスは微小変位-ひずみマトリクス $[B_i]$ とヤング係数とせん断弾性係数を含むマトリクス $[D]$ を用いて次のように求められる.

$$[k] = \int \int \int [B_i]^T [D] [B_i] dx dy dz \quad (1)$$

4.2 アルミニウム応力-ひずみ関係

数値解析モデル構築にあたり, まずパイプの材質であるアルミニウムについて応力-ひずみ関係をモデル化した(図-6). これは tri-linear 型として定義して, 中空単管へのデータフィッティングによってその諸元を求め, 本解析で用いた.

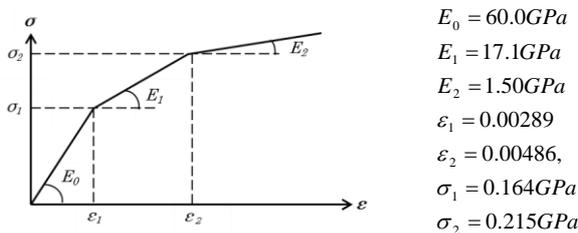


図-6 アルミニウム応力-ひずみ関係

4.3 乾燥砂充填 PIP の数値解析モデルの構築と考察

乾燥砂充填 PIP では重ねばり理論を適用し, 外管と内管をの重ね合わせから M-C 関係の再現を行う. また, 内管は外管の軸を一致させたまま曲げ変形を行うものではないことを考慮し, 中詰材である砂の相互作用を表現するために Winkler spring モデルを適用した. Winkler バネの適切な弾性係数 $k[kN/m]$ を求めるため, $k=1,10,100,1000[kN/m]$ と変化させ, 実験と解析結果の M-C 関係を比較する. 図-7 は実験と解析結果の M-C 関係を比較したものである. この図より弾性係数 $k=100\sim 1000[kN/m]$ が中詰材を表現しうる値であることがわかる. ここでこの弾性係数 k を地盤反力係数 k_f に換算すると, $k_f=10[kgf/cm^3]$ となることがわかる. 実験で砂を $1.60[g/cm^3]$ 前後になるよう締め固めたことから, $k_f=10[kgf/cm^3]$ となることは妥当であることがわかる. つまり, Winkler spring を適用した本解析モデルは概ね正確に乾燥砂充填 PIP の曲げ変形を表現することができると言える.

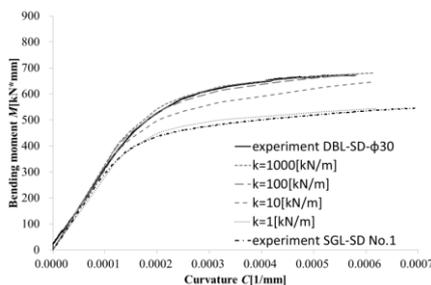


図-7(a)DBL-SD-φ30 M-C 関係

4.4 凍結砂充填 PIP の数値解析モデルの構築と考察

凍結砂の場合, 乾燥砂と異なり中詰材の応力-ひずみ関係から物性値を求め, ファイバー要素を用いたシンプルな数値解析モデルを適用する. また, 軸方向応力負担もするため Winkler spring は適用されない. そこでまず, 凍結砂の応力-ひずみ関係のモデル化を行う. 圧縮側に関しては上田らの研究を参考にモデル化を行い, 引張側に関しては赤川らの研究で明らかにされている引張強度を参考に圧縮強度の 0.1 倍としてモデル化を行った (図-8).

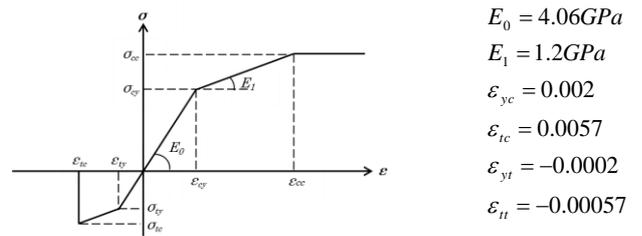


図-8 凍結砂応力-ひずみ関係

図-9 に実験結果と解析結果の比較を示す. 図-9 より, DBL-FS-φ20 の結果は解析結果がやや過小評価になってしまっているが, それ以外は正確に実験結果を表現している. よって, 本解析モデルは凍結砂充填 PIP の数値解析モデルとして妥当であることができたと考えられる.

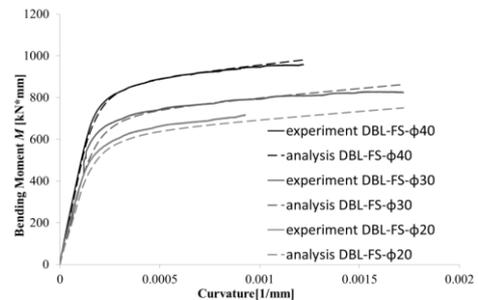


図-9 凍結砂充填 PIP 解析結果, 実験結果比較

5. まとめ

本研究では PIP に粒状体を充填した場合は Winkler spring モデルを適用することで, 凍結砂を充填した場合はファイバーモデルに適切な応力-ひずみ関係を与えることで, 中詰材が曲げ変形に及ぼす挙動を推測することが可能になったと考える.

6. 参考文献

- 1) 吉野廣一, 野中哲也: パソコンで解くファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析, 丸善, 2010
- 2) 上田保司, 生瀬孝博, 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
- 3) Satoshi Akagawa, Kohei Nishisato: Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe, ELSEVIER, 2009