

中詰砂充填による高靱性パイプインパイプの弾塑性挙動評価法

北海道大学大学院工学院 ○学生員 寺田豊 (Yutaka Terada)
 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研究院 正員 佐藤太裕 (Motohiro Sato)
 北海道大学大学院工学院 学生員 林昌宏 (Akihiro Hayashi)

1. はじめに

北方地域、特に北極海沿岸国及び北極海大陸棚には技術的に回収可能な未発見化石燃料が多く埋蔵されており、効率的なエネルギー輸送法が求められている。永久凍土地帯と季節凍土地帯を横切る天然ガスパイプラインは地盤の残留変位や凍上により、大きな曲げ応力を受ける。また、永久凍土地帯での適用以外にも、パイプラインに作用する軸力を軽減するために設けられるエルボー部などへは、大きな曲げモーメントが作用することが知られている。こうした現象に対して、従来は曲げ強度の高いパイプが広く用いられてきたが、曲げ応力をパイプ全体で効果的に受け持ち、大きな曲げ変形を許容する、可塑性材料充填パイプインパイプの適用¹⁾が注目されるようになってきた。筆者らの既往の研究では、中詰材として砂を用いることにより、曲げ剛性の向上はほとんど見られないものの、高靱性かつ変形追従性の高いパイプラインができることが実験的に確認されている²⁾。また、二重管における変形挙動の過程で、外管と内管の曲げ曲率には中詰砂の効果により差異が生じることも既往の研究により、明らかとなっている。このため、ひずみレベルの高い塑性領域も含めた変形挙動と弾塑性領域における外管と内管の連成効果を数理的に評価できる解析モデルの構築が可塑性材料充填パイプインパイプの実用化を促進するものと考えている。

本研究では、外管と内管の間に充填された砂を Winkler パネで表現し、弾塑性挙動における外管と内管の連成効果を評価するとともに、実験結果との比較を通じてその妥当性を検証する。これらの解析結果は主として曲げモーメント - 曲率関係(以下、M-C 関係)で整理し、中詰砂が外管と内管に与える影響等も考慮した弾塑性挙動評価手法について考える。

2. 実験概要

実験に用いたパイプの構造条件は、図-1 に示す通りである。また、中詰材として豊浦標準砂を用い、中詰材がパイプインパイプ構造に及ぼす影響の確認の為、単管の場合と二重管の場合で曲げ実験を行なった。二重管の場合については内管径の半径を 40[mm]、30[mm]と変化させ、実験を行なった。その他実験の詳細に関しては参考文献を参照されたい²⁾。

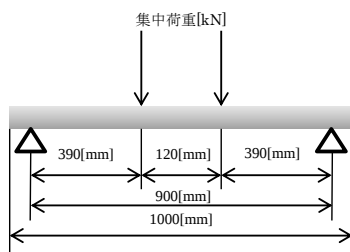


図-1 構造条件および载荷条件



3. ファイバーモデルによるモデル化

本研究では、解析モデルとして吉野らにより提案されたファイバーモデル³⁾を用いるものとする。また、外管と内管の連成効果を評価するため、外管と内管を Winkler パネで接合した二重管 Winkler モデルを設定し、解析を行うものとする。

3.1 ファイバーモデルの概要

梁理論として、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。また、本研究では微小変位理論に基づく弾塑性挙動評価を行うことを目的とし、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。

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

3.2 パイプインパイプ構造のモデル化

解析対象の構造条件は図-1 に示した通りであり、梁の離散化において、部材軸方向に 50 分割し、解析を行なった。この結果、1 要素あたりの長さは 0.02[m]となる。また、単管および二重管の断面諸元を図-2 に示す。管厚はいずれの場合も 1[mm]である。また、解析では、断面内において、円管を円周方向に 24 分割するものとした。二重管は中詰砂を Winkler パネで表現し、外管と内管を接合することにより、図-3 のような断面モデルを解析に用いた。

図-3 に示した断面モデルでは、中詰砂の弾性係数が小さくなればなるほど外管と内管の曲げ曲率の差は相対的に大きくなり、曲げに対する抵抗は外管の変形に負うところとなる。一方、弾性係数が大きくなるにつれ、外管と内管は一体的に挙動し、重ね梁の状態に近づいていくこととなる。

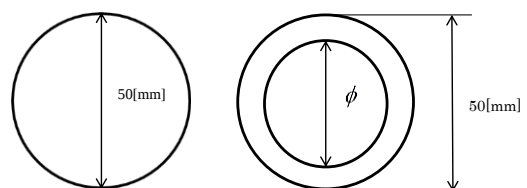


図-2 単管および二重管断面諸元

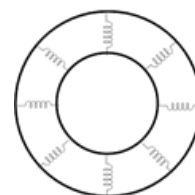


図-3 二重管 Winkler モデル

4. 実験値と解析結果の比較

ファイバーモデルでは、塑性化の判定を断面内の各ファイバー要素で行うため、その材料構成則を必要とするが、材料特性は既往の研究成果をもとに、図-4 のように設定した。この材料特性を用いて、単管および二重管の解析を行うものとする。

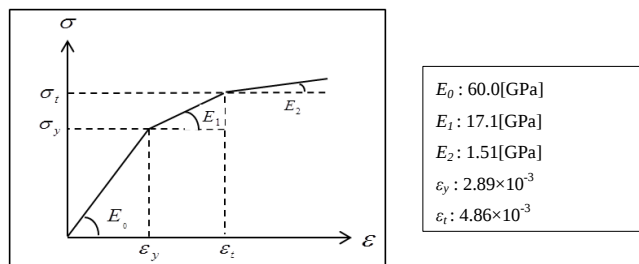


図-4 材料特性

4.1 単管断面

ファイバーモデルの解析では円管を正 24 角形で近似しているため、モデル化の妥当性を確認する目的で、直径 50[mm]の単管において得られた実験と解析結果の $M-C$ 関係を比較した。これを図-5 に示す。

図-5 の結果は、単管断面において、実験値とファイバーモデルによる解析値は良好な対応を示しており、円管断面の正 24 角形による近似は解析上妥当であることが明らかとなった。よって、二重管断面においても外管と内管共に正 24 角形に近似するものとした。

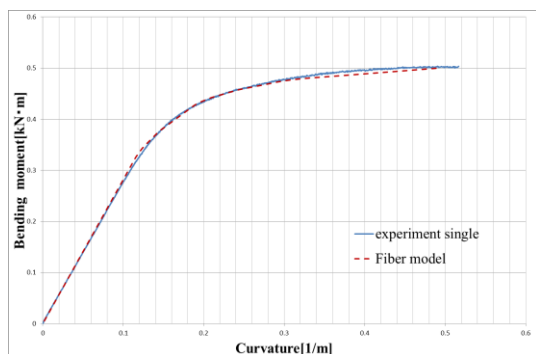


図-5 単管の $M-C$ 関係

4.2 二重管断面

次に、中詰材を用いたパイプインパイプの弾塑性挙動評価手法を考える。中詰材である砂は、断面内において外管と内管の間の応力伝達は担うものの、軸方向の曲げ剛性の向上にはほとんど寄与しないものと考えられる。よって、外管と内管の間の連成効果を適切に評価し得る、図-3 に示したような二重管 Winkler モデルを用いて二重管の弾塑性挙動解析を行うものとした。Winkler パネの弾性係数 k [kN/m]を変化させ、実験と解析結果の $M-C$ 関係を比較する。図-6 および図-7 は内管径がそれぞれ $\phi=40, 30$ の場合の $M-C$ 関係を、実験結果と解析結果とで比較したものである。

いずれの場合も $k=1000, 100$ [kN/m²]の場合に実験データと良い対応を示している。以上の結果から、中詰砂充填パイプインパイプ構造の弾塑性挙動は、二重管 Winkler モデルを用いたファイバーモデルによる解析により、再現性の高い評価ができることが判明した。また、弾性係数 k [kN/m]により、砂による外管と内管の変位拘束性を表現でき、外管と内管の連成効果を評価できることが明らかとなった。

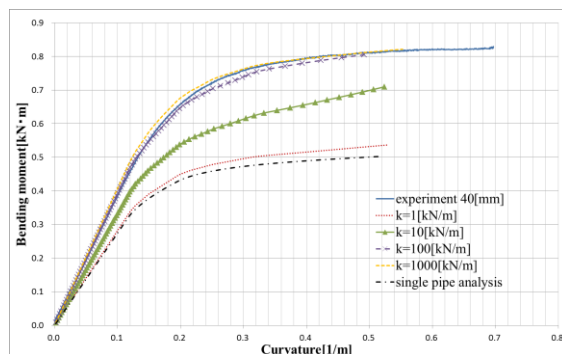


図-6 二重管($\phi=40$)の $M-C$ 関係

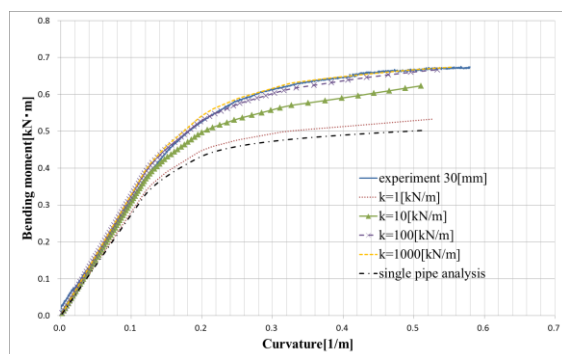


図-7 二重管($\phi=30$)の $M-C$ 関係

実験値と高い再現性を示している $k=100$ [kN/m]を、1 要素あたりの長さである 0.02 [m]で除し、単位を[kgf/cm²]に変換した後、外管の直径 50 [mm]で除すと、 $k \approx 10$ [kgf/cm³]となり、高密度に締め固められた乾燥砂の横方向地盤反力係数に概ね等しい値となる。このことから、弾性係数 k [kN/m]の値の設定は、中詰砂による地盤反力係数を目安として設定することが望ましい。以上により、本研究により、中詰材として砂を用いたパイプインパイプ構造の弾塑性挙動評価における数理的な解析モデルの構築が可能になったものと思われる。

5. 考察

本研究では、高靱性かつ高い変形追随性を有することが実験的に確認されていた中詰砂充填パイプインパイプに対し、その役割を考慮の上、外管と内管の間に充填された砂を Winkler パネで表現し、連成効果を考慮することにより、中詰砂充填パイプインパイプの弾塑性挙動に対し、弾性域から塑性域まで概ね一貫して再現性の高い解析結果が得られた。結果として中詰砂充填パイプインパイプの弾塑性挙動を数理的に評価する解析モデルの構築が可能になったものと思われる。

なお、この構造を実物大のパイプラインに適用した場合、期待通りの力学的効果が砂により得られるか否かを確認することが必要であり、今後の課題と考えている。

【参考文献】

- 1) M.Sato and M.H.Patel: Exact and Simplified Estimations for Elastic Buckling Pressure of Structural Pipe-in-pipe Cross-section under External Hydrostatic Pressure, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.12(4), pp251-262,2007
- 2) 蟹江俊仁, 佐藤太裕, 林昌宏: 中詰材料がもたらすパイプインパイプの塑性曲げ変形特性について, 平成 24 年度, 土木学会北海道支部, 論文報告書, 第 69 号, A-41
- 3) 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