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

Evaluation of elasto-plastic behavior of pipe-in-pipe based on a fiber modeling

北海道大学工学部	○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,断層などとは異なり,永久凍土地帯と季節凍土地 帯の境界面は曖昧であるため、局所的な補強は効果をな さない.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, 高靱性かつ変形追随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.⁽³⁾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の評価技 術の確立が、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、これまでに得られた実験材料の応力ひず み関係に基づいて、対象構造物をファイバーモデルでモ デル化し、弾塑性領域での挙動評価を行うとともに、実 験結果との比較を通じてその妥当性を検証するものとす る.これらの解析結果は主として曲げモーメントー曲率 関係(以下,*M-C*関係)で整理し、内管と外管との役割の 違い等も考慮した変形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],20[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⁾.



3. ファイバーモデルによるモデル化

本研究では、梁理論として、Timoshenko 梁理論を採用 する.また、ファイバーモデルでは部材断面を微小要素 に分割し、その各セルにおける直応力と直ひずみの関係 をもとに計算することを基本とする.⁽³⁾断面内での塑性 化については、「平面保持の仮定と断面不変の仮定」⁽⁴⁾ の下、各セルにおける部材軸方向の応力とひずみだけで 評価する.また、立体骨組構造物に対し解析を行う際に、 ねじれ変形まで考慮する場合があるが、本研究では Saint Venant ねじりは弾性と仮定している.部材内の任 意の点、x、y、z に対して x、y、z 軸方向の増分変位を U、V、Wとして次式に示す.(図-2)



図 2 要素座標系

$U(x, y, z) = u(x) - y\theta_z(x) + z\theta_y(x) + \omega(y, z)\theta_x(x)$	(1.1)
$V(x, y, z) = v(x) - z\theta_x(x)$	(1.2)

$$W(x, y, z) = w(x) + y\theta_x(x)$$
(1.3)

ここで, *x*, *y*, *z*, θ_x , θ_y , θ_z は, 要素座標系の *x* 軸上 での値であり, *x* 軸方向にのみ変化している. また, $\omega(y,z)$ はそり関数であり, 断面内で変化する.

ひずみベクトル ε の微小変位項 ε_l は,変位成分 U,V,W により,次のように表される.

$$\varepsilon_{l} = \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \end{cases} = \begin{cases} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \end{cases}$$
(1.4)

軸方向については,非線形解析における解の安定性を 重視し,各軸方向の変位量,回転角を1次式で補間する ものとした.以上の条件から,変位とひずみの関係は以 下のように示される.

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{x} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{zx} \end{cases} = [B_{I}] \{ u_{1}, v_{1}, w_{1}, \theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}, u_{2}, v_{2}, w_{2}, \theta_{x2}, \theta_{y2}, \theta_{z2} \}^{T}$$
(1.5)

 B_l は、変位-ひずみマトリクスと呼ばれるものである.

その結果,要素剛性マトリクスは変位-ひずみマトリクス[*B*]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.

$[k] = \iint \iint [B_l]^T [D] [B_l] dx dy dz \tag{1.6}$

なお、剛性マトリクスの計算は断面内の積分に関して は各セルの中心で行い、梁要素の長さ方向の積分に関し ては、shear locking 現象を防ぐため、梁の中央1点積分 の次数低減積分を行うものとした.

4. 実験値とファイバーモデルによる解析の M-C 関係

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,要素を32分割し,解析を行なった. また,単管および二重管の断面諸元を図-3に示す.管 厚はいずれの場合も1[mm]である.また,ファイバーモ デルでの解析では,断面を正24角形の円管として近似 した.



図-3 単管断面および二重管断面諸元

また,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.



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,解析の精度と信頼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.

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.このた め、最もシンプルなモデルとして、外管と内管の形状と 位置関係は保持したまま曲げを受けるものと仮定し、単 純重ね合わせモデルを適用した.図-6 は内管径が ¢ =40, 30,20[mm]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.



図-6から明らかなように、両者はいずれの場合も良好な整合性を示しており、中詰材に砂を用いたパイプインパイプの弾塑性挙動は、ファイバーモデルを適用した外管と内管の重ね合わせで概ね評価できることが判明した.

5. 考察

以上の結果から、中詰材としての砂の役割は、断面内 における外管と内管の応力の伝達に寄与するものの、軸 方向の曲げ剛性にはほとんど寄与しないということが確 認された.しかし、 *φ* =40, 30, 20[mm]のいずれの場合 も弾性域から第1降伏点付近で解析値の曲げモーメント の方が実験値に比べわずかに高めとなっていることがわ かる.この現象は、内管と外管とのわずかな曲率のずれ によるものと考えられ、実用化に向けては更なる研究が 必要である.

【参考文献】

41

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 Marin 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-

3)酒井忠明:構造力学,技報堂出版,1版14刷,1989 4)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