

フレキシブルパイプインパイプの曲げ挙動における解析モデルの検討

北海道大学大学院工学研究科	学生員	○渡辺香奈
北海道大学大学院工学研究科	学生員	白石圭祐
北海道大学大学院工学研究科	正会員	佐藤太裕
北海道大学大学院工学研究科	正会員	蟹江俊仁
北海道大学大学院工学研究科	正会員	赤川 敏
国土交通省	正会員	嶋崎賢太

1. 目的

地盤変動が頻発する地帯や活断層を有する地帯などにおいて、エネルギー資源の安定供給を実現するための輸送技術に資する構造安定性の高いパイプライン、配管設計法を確立するため、曲げ応力の低減が指摘されている。これに対処するための「高圧に耐え得るフレキシビリティ、靱性の高いパイプ」は、必須の要素技術の一つでありながら、要求仕様を満足するものは現存していない。そこで本研究では、中詰材として砂や粒状体など流動性の高い可塑性材料を入れることにより、変形拘束性・応力伝達性能を向上させ、その結果として座屈に強く要求される曲げ特性を発揮し得る、図-1 に示すようなパイプインパイプ断面¹⁾のコア部を粒状体とする新しいフレキシブルパイプを提案する。本論文では、パイプインパイプの簡単な実験概要とパイプインパイプに曲げ外力が与えられたときの曲げ挙動を適切に評価し得る解析モデルについて報告する。

2. 実験概要

図-2 は本研究で用いた 4 点载荷曲げ実験の装置である。パイプに与えられる曲げモーメント M はロードセルによる荷重から、曲率 C は 3 箇所を設置した変位計からそれぞれ換算する。本実験ではパイプインパイプに中詰材として砂を充填した供試体での曲げ実験を行う。管長 1m、管厚 1mm の外管（直径 $d=50\text{mm}$ ）と内管（ $d=40\text{mm} \cdot 30\text{mm} \cdot 20\text{mm}$ ）を用いた径比の異なる 3 パターンでの曲げ実験と、比較のため外管のみの単管に砂を中詰した場合の実験も行う。以上をもって作製するパイプにロードセルで载荷していく。ここで、ひずみゲージを外パイプの中央部分に 1 対、変位計を 3 箇所に設置し、これらの

変動がほぼ一定と見なせる時点で载荷終了とする。

図-3 が実験によって得られたパイプの $M-C$ 曲線であり、この結果より内管径が大きくなる毎にパイプの靱性が高くなっていると判断できる。原因には砂のせん断抵抗力が関係していると考えられる。単管の場合はパイプに外力が与えられると外管の剛性と充填された砂のせん断力で負担することとなるが、内管径 40 mm（図中 $\phi 40$ ）の比較的直径が大きいパイプインパイプの場合、外力は外管の剛性と充填された砂のせん断力だけでなく内管の剛性も負担することとなるため、単管に比べ内管径が大きいパイプインパイプの方が高靱性を発揮すると予想している。

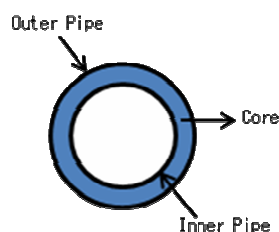


図-1 パイプインパイプ

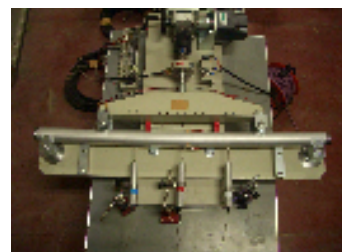


図-2 実験装置

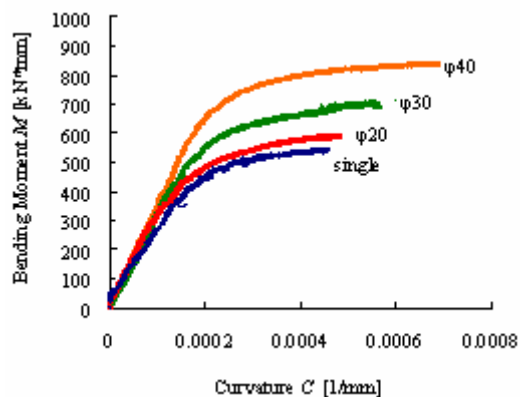


図-3 実験結果

キーワード：パイプインパイプ、曲げ、弾塑性
 連絡先：〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
 TEL 011-706-6176 FAX 011-706-6174

北海道大学大学院工学研究科

3. 解析モデルの検討

パイプインパイプの曲げ挙動の解析モデルを導出するにあたって、矩形梁の純粋曲げによる弾性状態、及び弾塑性状態の $M-C$ の相関の導出方法を円断面、単管断面、二重管断面の順に応用して導出する。このとき、二重管断面の解析モデルがパイプインパイプの解析モデルとなる。本論文では矩形断面と二重管断面の解析モデルの導出方法を記述する。

まず矩形断面における解析モデルを検討する。断面の幅、高さがそれぞれ b , h の矩形断面をもつ梁が両端の曲げモーメント M によって純粋曲げを起こしている場合を考える。このときの応力分布を図-4 に示す。この図の (b) のように縁応力が降伏応力 σ_y に達すると弾性限界となる。(b)の状態を超え(c)のように上下部に塑性域ができると弾塑性状態となり、図中の $|\xi| \leq 1$ で弾性部分を表すパラメータとしたとき、 $\xi=0$ である(d)のときに完全塑性となる。弾性状態においては理論解 $M=EIC$ より解析モデルが得られる。次に弾塑性状態においては理論解 $M=\sigma I/y$ を用いて検討する。ここで y は中立軸距離、 σ は応力である。この弾塑性状態における式を中立軸距離方向に $0 \leq y \leq \xi h/2$ の弾性域と $\xi h/2 \leq y \leq h/2$ の塑性域において積分を行うことで解析モデルが得られる。

これを応用して図-5 に示すような外管の外径 $2R$ 、内径 $2R'$ 、内管の外径 $2r$ 、内径 $2r'$ の二重管断面における解析モデルを導出する。ここで本解析は中空状態かつ完全弾塑性を仮定したものである。弾性状態においては理論解 $M=EIC$ より、弾塑性状態においては $\xi R \geq R'$, $r \leq \xi R \leq R'$, $r' \leq \xi R \leq r$, $\xi R \leq r'$ に場合分けを行い、理論解 $M=\sigma I/y$ より解析モデルを得る。

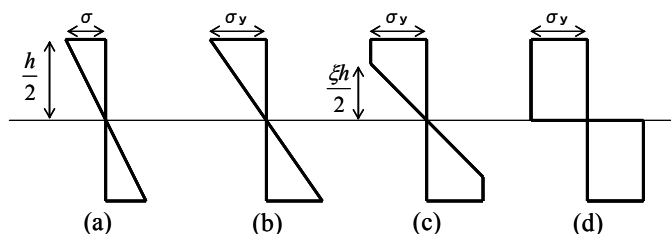


図-4 応力分布図

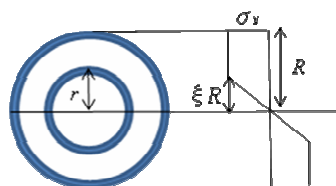


図-5 二重管断面の応力分布図 ($\xi R \leq r'$ の場合)

4. 実験結果と解析結果の検討

内管径 20mm と 40mm の実験結果(Experiment)と解析結果(Analysis)を比較したグラフを以下に示す。

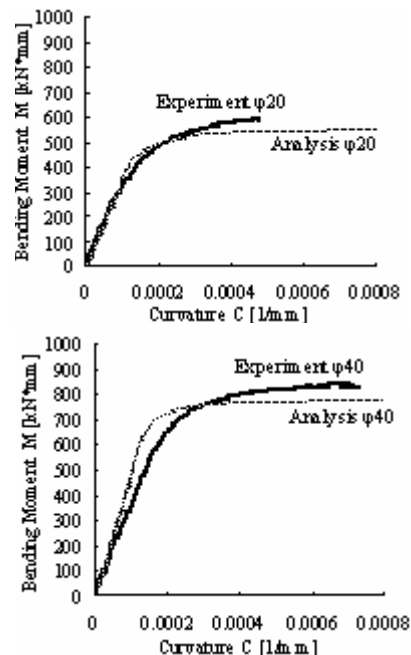


図-6 実験結果と解析結果(上: $\phi 20$, 下: $\phi 40$)

5. まとめと今後の課題

図-6 より本解析モデルは曲げ挙動の傾向を捉えた有効な結果と判断できる。実験結果の初期段階において弾性状態の理論解とほぼ一致していることから、中詰材として用いた砂は曲げ剛性に寄与しないと判断できる。また紙面の都合上掲載できないが、単管と内管径 30mm の場合でも同様の傾向が見られた。一方で内管径が大きいほど弾性域での解析結果と実験結果のずれが大きいと判断できる。この原因は、パイプが曲げ外力を受けた際、内管径が大きいほど外管と内管の中立軸のずれが生じやすいことが考えられる。よって今後は中詰材の作用や中立軸のずれを考慮したより精密な解析モデルの導出を検討する。

謝辞：本研究は経済産業省革新的実用原子力技術開発費補助金により実施されたものであります。関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) M. Sato and M. H. Patel: Exact and Simplified Estimations for Elastic Buckling Pressures of Structural Pipe-in-Pipe Cross-sections under External Hydrostatic Pressure, Journal of Marine Science and Technology, Vol.12(4), pp.251-262, 2007.