

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

Experimental study on bending properties of flexible pipe-in-pipe

北海道大学工学部 ○学生員 小渡知己 (Tomoki Kowatari)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 白石圭祐 (Keisuke Shiraishi)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 佐藤太裕 (Motohiro Sato)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 蟹江俊仁 (Shunji Kanie)
 (株) システム工学研究所 正 員 赤川 敏 (Satoshi Akagawa)

1. はじめに

地盤変動が頻発する地帯や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必要がある。そこで曲げ応力の低減という大きな技術的課題が指摘されている。これに対処するための「高圧に耐え、かつ靱性の高いパイプ」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。そこで本研究グループでは、内側と外側のパイプの間に中詰材として、それ単独では構造材としての機能を持ち得ない、砂のような流動性を有する可塑性材料を挿入するという独自の発想に至った。つまり、その流動性を積極活用することで、断面変形拘束性・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させる。本研究グループでは、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、世界で例を見ない新しいフレキシブルパイプを開発すべく、07 年度より実験・解析両面から研究を開始した。本研究では、07 年度に行った中空の単管パイプに対しての曲げ実験結果²⁾と、08 年度から本年度も継続するパイプインパイプ構造に対しての曲げ実験結果の双方を比較することで、中詰材とパイプの相互作用により発揮される性能を評価することを目的としている。

2. 実験

2.1 実験概要

図-2 は本研究で用いた実験装置である。曲げモーメント M はロードセルによる荷重の値から、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。また、軸方向中央に一对のひずみゲージを設置することにより圧縮・引張それぞれの曲げひずみからも曲率も換算できるようにした。さらに載荷点間の距離は変えられる構造となっている。前回までの実験では曲げ破壊ではなくすべて載荷点でのせん断破壊であった。そこで今回は載荷点間の距離を短くし、少ない荷重でより大きなモーメントを加えられるようにした。

本実験では供試体として中詰材に砂を用いたパイプインパイプを使用する。パイプはアルミニウムパイプを使用し、管厚 1mm の外管 (外径 $d = 50\text{mm}$) と内管 (外径 $d = 20\text{mm}$, 30mm , 40mm) から径比の異なる管長 1 m

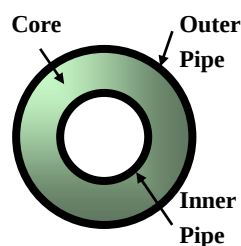


図-1 パイプインパイプ

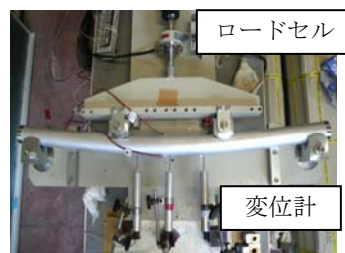


図-2 実験装置

の 3 パターンのパイプインパイプ ($\phi 20$, $\phi 30$, $\phi 40$) を作製し曲げ実験を行う。充填する砂はすべて豊浦標準砂を用い、いずれの場合もパイプの外側からソフトハンマーで叩き締めることにより $1.57 \sim 1.60\text{g/cm}^3$ の高い密度を保つようにした。端部にはエンドキャップをはめ、蓋の役割とともにパイプインパイプ構造を保持する役割を持たせている。また、07 年度の中空単管パイプの実験においては、載荷点での破壊を防ぐために供試体に支持部材を挿入した。以上をもって作製する供試体にロードセルで載荷し、曲げを加えていく。ここで、ロードセル・ひずみゲージの変動が一定になった時点で載荷終了とする。

2.2 実験結果

図-3 は本年度に行った中詰材として砂を用いたパイプインパイプの径比による結果の違いの比較であり、パイプにかかる曲げモーメント M と曲率 C の関係である。図中の点線は 07 年度に行った中空単管パイプの破壊時の曲率である。

載荷終了の際、中空単管のパイプにおいてはパイプ中央部での断面のつぶれによる破壊が見受けられた(図-4(a))。パイプインパイプについては、内管径 20mm, 30mm の場合には載荷点でのせん断による破壊、内管径 40mm の場合はパイプ中央部での圧縮側の軸方向へのつぶれが見られた(図-4(b))。

図-5 は外管・内管引張側のひずみゲージで測定した曲げひずみからそれぞれ曲率を求めた場合の $M-C$ 関係であり、図中の直線は中空の外管と内管の弾性状態における理論解を足し合わせたものである。

$$M = EIC$$

ここで I は断面二次モーメントである。

3. 考察

図-3 より、砂充填のパイプインパイプは中空単管の破壊時よりもずっと大きな曲率まで破壊しない、すなわち靱性が向上していることがわかる。中空単管の場合、曲げモーメントが最大となる位置で断面のつぶれにより変形が局所化し破壊した。これは断面二次モーメントが減少することにより、弾性理論により得られる許容曲げモーメントよりも小さな値で曲げ破壊を起こすことを意味している(Brazier effect³⁾)。これに対し、砂を充填したパイプインパイプは断面のつぶれによる破壊は起こらず、圧縮側軸方向のつぶれによる破壊となった(図-4)。これはパイプインパイプ構造にすることにより曲げによる断面のつぶれを防ぐことができ、中空単管の場合よりも大きな曲率まで破壊しなかったと考えられる。また、内管径 30mm, 20mmのパイプインパイプは破壊形式が荷点付近でのせん断によるものであるため、純粋な曲げ破壊とは言えず、より大きな曲げ変形を許容できるであろうと推測できる。一方、内管径 40mmのパイプインパイプの破壊形式はパイプ中央部での圧縮側の軸方向へのつぶれであることから、材料自身の限界曲げ応力に達したと思われる。

図-5 において、外管・内管引張側ひずみから曲率を求める際に以下の式を用いる。

$$C = \varepsilon / y$$

ここで、 y はパイプ中立面からの距離である。この式を用いる前提として、1)パイプの軸に直角な断面は曲げ変形を受けた後も平面を保持、2)変形後の曲率は非常に小さいという二つの仮定が設けられている。すなわちパイプインパイプ構造においては断面のつぶれを防ぐことができるので、曲率の小さい段階においてはひずみから曲率を求めた結果の精度は高いと言える。図-5 より、実験結果の初期段階において内外管の引張ひずみから求められた曲率がほぼ一致していることがわかる。これより、砂を充填したパイプインパイプは同一曲げモーメントを受ける際、少なくとも弾性域内では内外管はほぼ同じ曲率で変形し、中立軸のずれがないと考えられる。

また、図-3 において各パターン間での弾性域における曲げ剛性の差は各内管の曲げ剛性の差に近い。また図-5 においてパイプのみの曲げ剛性より求めた弾性の理論解と、ひずみから曲率を求めた場合の実験結果がほぼ一致している。以上 2 点より、中詰材に砂のような粒状体を用いたとき、砂は連続体ではなく引張抵抗しないので曲げ剛性に寄与しないことがわかる。

以上より、本研究グループが提案するパイプインパイプは「靱性の高いフレキシブルパイプ」であることが示唆される。

4. まとめと今後の課題

本研究で行った実験により、中詰材として砂を用いたパイプインパイプは曲げ変形時の断面のつぶれを防ぎ、単管パイプに比べずっと大きな曲率まで破壊しない高い靱性を持つということが確認できた。これは本研究グループが期待していた性能を満たすものである。

今後は、ガラスビーズを用いた粒径変化実験等につい

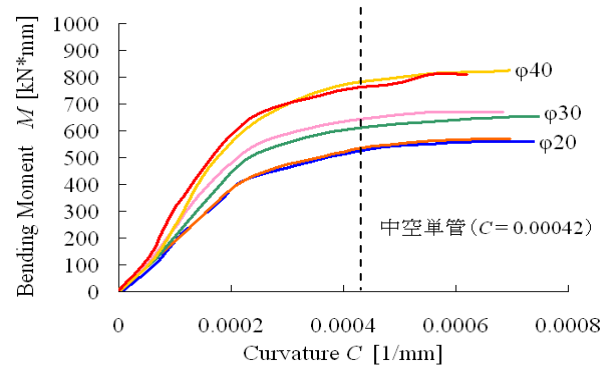


図-3 M-C 関係



(a) 中空単管破壊 (b) 内管径 40mm 破壊

図-4 破壊形式

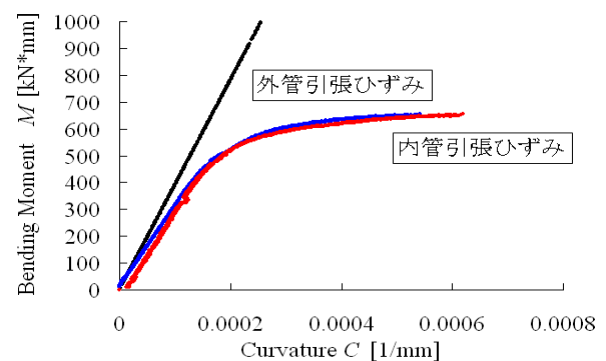


図-5 ひずみから曲率を求めた場合の M-C 関係

て実験を行っていき、粒状体を充填したパイプインパイプの曲げ特性についてさらなる研究を進めていく。

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.
- 2) 白石圭祐・佐藤太裕・嶋崎賢太・田中邦憲・蟹江俊仁・赤川 敏：可塑性材料を充填した鋼管の曲げ特性に関する基礎的検討，土木学会全国大会第 63 回年次学術講演会講演概要集，I-370, 2008
- 3) Brazier, L. G.: On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections, Proceedings of the Royal Society of London A116, pp.104-114, 1927.