

中詰材に砂を充填したパイプインパイプの曲げ特性に関する実験的検討

Bending properties of pipe-in-pipe systems with sand cores

北海道大学工学部

○学生員 渡辺香奈 (Kana Watanabe)

北海道大学工学部工学研究科

学生員 白石圭祐 (Keisuke Shiraishi)

北海道大学大学院工学研究科

正員 赤川 敏 (Satoshi Akagawa)

北海道大学大学院工学研究科

正員 蟹江俊仁 (Shunji Kanie)

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

学生員 嶋崎賢太 (Kenta Shimazaki)

1. まえがき

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ため、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。そこで本研究グループでは、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開発すべく、昨年度より実験・解析両面から研究を開始した。本研究では、昨年度の研究から得られた、単管に中詰材を充填した場合の結果²⁾を基に行ったパイプインパイプでの実験結果について報告する。

2. 実験

2.1 実験装置

図-2は、本研究で用いた4点載荷曲げ実験の装置図である。昨年度の研究結果²⁾から実験の再現性の高さが実証されており、本実験でもパイプとロードセルの接触点(図-3)を二重管に適する形状に変更することで引き続き使用することとした。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。接触点は図-3に示すように、パイプへの荷重が面で伝わり、パイプの曲がりに沿うよう回転する構造となっている。またロードセルは載荷点間の距離を変えられる構造となっている。

2.2 実験方法

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。外管(管長 $l=1\text{m}$, 直径 $d=50\text{mm}$, 管厚 $t=1\text{mm}$)と内管($l=1\text{m}$, $d=40\text{mm}$ ・ 30mm ・ 20mm , $t=1\text{mm}$)にはアルミニウムパイプ(ヤング係数 $E=70\text{kN/mm}^2$, 降伏応力 $\sigma_y=0.145\text{kN/mm}^2$)を用いて、径比の異なる3パターンでのパイプインパイプの曲げ実験を行う。また、比較のため外管のみの単管に中詰した場合の曲げ実験も行う。砂を充填する際ソフトハンマーで叩き高密度となるようにし、いずれの場合も密度は $1.58\text{g/cm}^3 \sim 1.62\text{g/cm}^3$ の間に収め、大差のないよ

うにする。また端部にはエンドキャップをはめて、蓋の役割に加えてパイプインパイプ構造を保持する役割を持たせている。以上をもって作製するパイプインパイプにロードセルで載荷していく。先に挙げたアタッチメントの持ち得る利点を発揮させるべく、パイプとアタッチメントの滑りが良くなるよう、第1回目の実験ではその接触部にテフロンを巻き、第2回目の実験ではグリスを塗ったテフロンを巻いた。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箇所を設置し、これらの変動がほぼ一定と見なせる時点で載荷終了とする。また、第2回目の実験の際、より小さな荷重で大きな曲げモーメントと曲率を得るため載荷点間の距離を縮めた。

2.3 実験結果

図-4から図-6が第1回目、図-7が第2回目の実験によって得られたパイプの曲げモーメント M と曲率 C の関係と、点線で示した各の場合における中空での弾性状態の理論解による次式の関係の載せたものである。

$$M = EIC \quad (1)$$

ここで I は断面二次モーメントである。

載荷終了の際、いずれの場合も外管の載荷点付近で局部座屈が見受けられた。その後、パイプは外管・内管共に曲率を低下させ、内管にいたっては第1回目の実験で最終的に載荷点間での変形がほぼ元に戻る弾性的な挙動を確認できた。しかし第2回目の実験では、外管の残留変位が第1回目の実験よりも大きかったため、外管から内管を取り出すことができなかった。しかし、内管にもある程度の残留変位が生じていることが予想される。

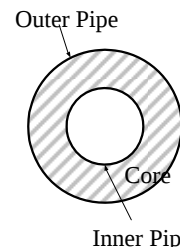


図-1 パイプインパイプ構造

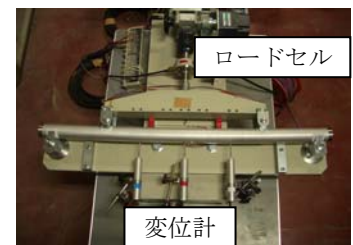


図-2 実験装置



図-3 アタッチメント（接触点）

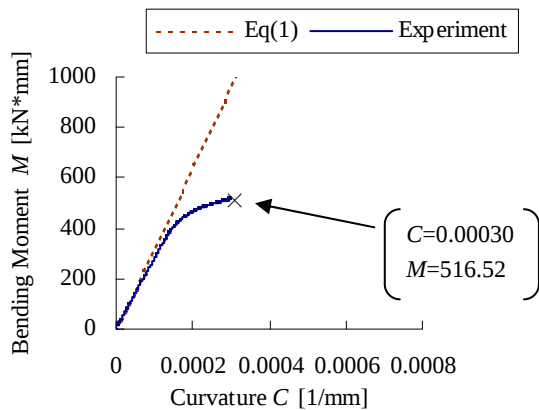


図-4 M-C 関係 (第1回目, 単管)

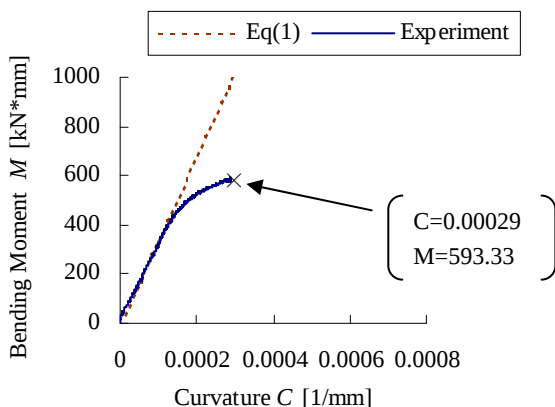


図-5 M-C 関係 (第1回目, 内径 20mm)

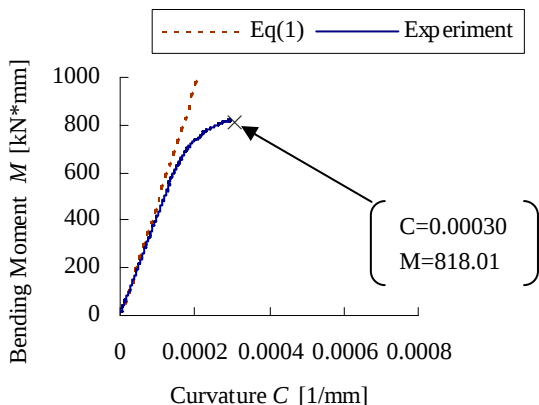


図-6 M-C 関係 (第1回目, 内径 40mm)

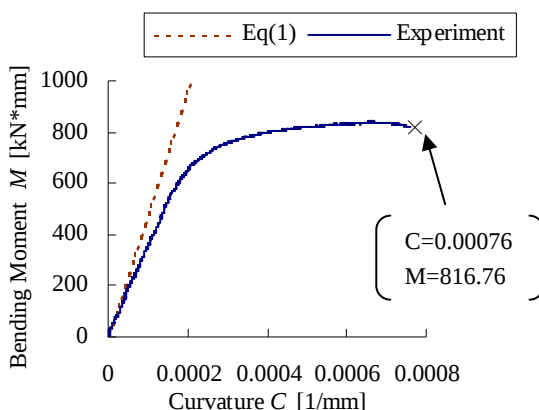


図-7 M-C 関係 (第2回目, 内径 40mm)

3. 考察

図-4 から図-6 より, 第1 回目はいずれもほぼ同じ曲率にて破壊に至ることがわかる. 破壊モードはいずれも外管の載荷点付近に見受けられた局部座屈であり, それ以上荷重を与えてもひずみ・変位共に変動が見られなくなった. このことから, 第1 回目の実験ではパイプそのものはいずれもこれ以上の大きな曲げ変形を許容でき, 2. 1 で挙げたアタッチメントの持ち得る利点が発揮できていないと判断できる. 一方で図-7 より, 載荷点間の距離を縮めた第2 回目の実験では, 接触部をさらに工夫したことでアタッチメントの利点が発揮され, 著者らが期待する高靱性を確認することができた. 荷重を受ける単管パイプは, 一般的に曲げモーメントが最大となる箇所ですべて断面がつぶれ, 変形の局所化が起こり得る³⁾. それに対し本研究で取り上げたパイプでは, 中詰材に用いた砂がその可動性を活かすことで, 応力の再配分を行いつつ断面を円形に保つ役割を有することとなる. これが靱性を高めるメカニズムと考えられる. また, いずれも実験結果の初期段階において, パイプのみの剛性より求めた中空での弾性状態の理論解とほぼ一致していることが確認できる. このことは, 中詰材に砂のような粒状体を用いた場合, 中詰材が曲げ剛性に寄与しないことを意味する. 上記の点は本研究グループの提案するパイプインパイプが, 「靱性の高いフレキシブルパイプ」であることを示唆しているといえる.

4. まとめと今後の課題

本研究では中詰材として砂を用いたパイプインパイプを提案し, 基礎的な曲げ実験から著者らが期待する靱性の高い特長を確認した. ただし破壊は全て接触部で起こっており, パイプそのものはまだ曲げ変形に対し余裕があると考えられる. このため今後は, パイプの局部座屈を防ぐアタッチメントの更なる工夫を検討し, 実験を継続する予定である. また解析に関しては, パイプインパイプにおける弾塑性変形の構造解析モデルを検討し, 実験結果と比較する予定である.

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.
- 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.