

フレキシブルパイプインパイプの提案と その曲げ特性に関する基礎的検討

BASIC INVESTIGATION ON BENDING PROPERTIES OF FLEXIBLE PIPE-IN-PIPE SYSTEMS

佐藤太裕¹・渡辺香奈²・白石圭祐³・蟹江俊仁⁴・赤川 敏⁵

Motohiro SATO, Kana WATANABE, Keisuke SHIRAISHI,
Shunji KANIE and Satoshi AKAGAWA

1, 4, 5正会員 博士(工) 北海道大学大学院工学研究科 北方圏環境政策工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

2, 3正会員 学士(工) 北海道大学大学院工学研究科 北方圏環境政策工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

This study proposes a new flexible pipe-in-pipe system with granular cores. Pipe-in-pipe systems have significant potential for application in oil and gas production systems because of their property that combines insulation performance with structural strength in an integrated way. Such cross-sections comprise inner and outer thin walled pipes with the annulus between them fully filled by a selectable thick filler material, such as polymers or ceramics, to impart an appropriate combination of properties. In order to obtain the flexibility for pipe-in-pipe, however, we got an idea to use sand or granular materials as the annulus filler. Consequently, we expect some novel bending characteristics, such as: 1. Ovalization of the cross section can be prevented. 2. Local collapse is not occurred. 3. High toughness and low rigidity can be obtained. Here, in order to verify our predictions above, we have been carried out the four point bending tests on the flexible pipe-in-pipe systems with sand cores.

Key Words : *pipe-in-pipe, bending property, four point bending test, elasticity, plasticity, moment-curvature relationship*

1. はじめに

海洋でのエネルギー輸送を目的としたパイプラインは、極大水深域における極めて大きな静水圧作用や曲げに対する耐崩壊性、石油やガスといった高温流動体に対する耐熱性、浮力と自重のバランスによる水中での構造安定性といった性能が、非常に高い次元で要求される構造物である。

本研究は、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えない、砂や粒状体など流動性を有する材料を挿入するという独自の発想のもと、従来型のパイプインパイプ構造^{1),2)}が持つ利点は保持しつつ、その流動性を逆に積極活用することで、

- ・ 優れた断面変形拘束性、応力伝達性能を発揮する
- ・ 要求される曲げ特性や座屈性能を密度、含水比等により制御しやすい

などの従来構造では実現し得ない、または実現困難な特長を持つ、世界で例を見ない新しい「曲がりや

すいが壊れにくい」パイプインパイプ構造として「フレキシブルパイプインパイプ」を提案し、その曲げ特性について室内実験から基礎的な知見を得ることを目的としたものである。また、その前段階の予備的な実験として径 50mm のパイプに中詰材を完全に充填したもので、砂が靱性を高める効果についても検証を行い、既に公表している³⁾。本論文では、中詰材としての砂が曲げ特性にもたらす影響について論ずるため、その一部についても述べることにする。

2. フレキシブルパイプインパイプの特長

従来型のポリマーやセラミックなどの中詰材を用いる場合、材料費が高価となる点や、曲げ剛性が過大となり敷設が容易ではなくなる場合がある点、またパイプと中詰材の付着が外れた際の応力集中などの問題点が挙げられる。それに対して本研究で提案するフレキシブルパイプインパイプは、以下のように

な利点を有すると著者らは考える。

- ・ 極大静水圧には抵抗し、衝撃荷重など作用時間の短い動的外力を吸収しやすく、かつ砂質の粒度分布、密度、含水比の制御により要求される曲げ特性をコントロールしやすい。
- ・ 曲げによる普通のパイプの崩壊パターンの多くは、断面の局所的なつぶれ (Brazier 効果⁴⁾) に起因する局部座屈である。それに対し本研究にて開発するパイプは、粒状体の抗圧縮性により断面のつぶれを抑制し、かつ粒の可動性により応力、変形の平滑化を可能とする。
- ・ 中詰材は曲げ剛性を有しないため、合成断面として曲げ剛性をいたずらに増すことなく曲げによる靱性向上を実現する、つまり「曲がりやすいが壊れにくい」性質を発揮することができる。
- ・ セラミック、ポリマーなど既存のパイプインパイプに比べはるかに安価で製作可能である。

3. 実験概要

2. において述べた構造力学的な特性について、本研究ではパイプインパイプの基本的な曲げ実験より明らかにすることとした。以下にその曲げ実験の概略を示す。

(1) 実験装置

図-2 は本研究で用いた4点载荷曲げ実験の装置である。また図-3 は実験装置の簡略化したイメージ図を示している。端部近くを2つの支点で支えられたパイプの中央点に対し、対象の位置に载荷する4点曲げを行うことにより、荷重载荷点間の曲げモーメント M および曲率 C を一定とすることができる。本実験では3箇所に設置した変位計にて変位を計測し、変位計間の距離と中央、左右の変位差から曲率を換算することとした。作用荷重に対する曲げモーメント値を制御可能とし、また将来的な3点曲げ実験も視野に入れ、ロードセル部分は荷重载荷点間の距離を変えられる構造を取り入れた。また荷重载荷点はローラー状、支点とパイプの接触部分は図-4 に示すようにパイプへの荷重が面で伝わり、かつパイプの曲がりの沿うように回転する形状とした。これにより、荷重载荷にともなうパイプ軸方向変位を拘束することなく、純曲げによる曲げモーメント-曲率関係を得ることができる。

(2) 実験供試体

供試体はパイプインパイプに中詰材として標準砂を充填したものである。外管 (管長 $l = 1\text{m}$, 直径 $\phi = 50\text{mm}$, 管厚 $t = 1\text{mm}$) と内管 ($l = 1\text{m}$, $\phi = 40\text{mm} \cdot 30\text{mm} \cdot 20\text{mm}$, $t = 1\text{mm}$) にはアルミニウムパイプを用いて、内管/外管径比の異なる3パターンでのパイプインパイプの曲げ実験を行うこととした。砂を充填する際には、ソフトハンマーを用

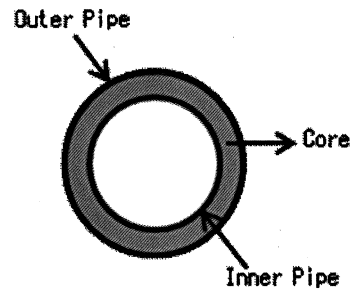


図-1 パイプインパイプ断面のイメージ

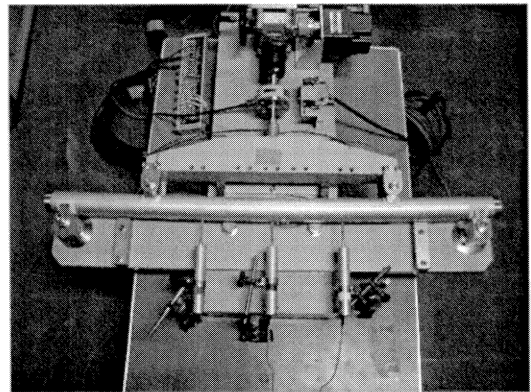


図-2 4点曲げ実験装置

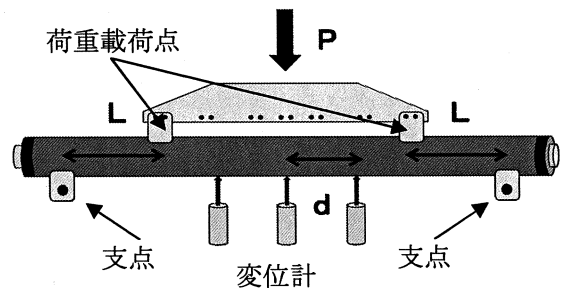


図-3 4点曲げ実験装置の模式図



図-4 支点



図-5 パイプのエンドキャップ
(左: 内管径 30mm, 右: 内管径 20mm)

いて高密度かつ供試体間のばらつきを小さくする工夫をした。これにより供試体は中詰材密度をすべて $1.58 \sim 1.62 \text{ g/cm}^3$ の範囲に収まるように作成した。また単管以外の実験では供試体の二重管構造を保持するためにパイプ端部に、図-5 に示すような各内径に合わせたエンドキャップを製作し、取り付けることで、中詰材に対して蓋の役割を持たせることとした。

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。実験はひずみ制御で行い、全てひずみゲージを外パイプの中央部分の圧縮側と引張側に1対貼り、上述した3箇所の変位計から見られる変位とひずみの変動がほぼ一定と見なせる時点で載荷終了とし、載荷時と同速度で除荷していくこととした。

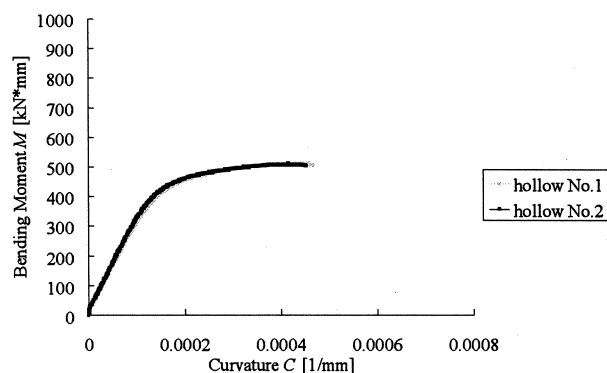
4. 実験結果と考察

(1) 中空管と中詰材完全充填管の曲げモーメントー曲率関係の比較

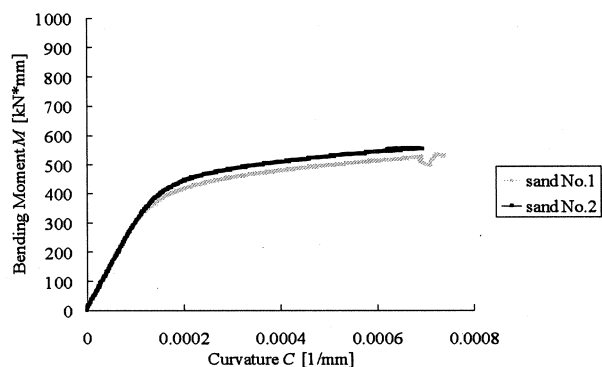
図-6 は中空管と中詰材として砂を充填した管における、曲げ実験により得られた曲げモーメント M と曲率 C の関係を示したものである（この実験結果は3. で示した実験装置、パイプ端部の処理などと若干ではあるが違いのある実験から得られたものである。その詳細については文献 3) において述べられている）。それぞれに対し同条件で2度ずつ実験を行った（図中の No.1, 2 に対応）。それぞれの場合において、同条件下ではほぼ同様の実験結果が得られていることから、再現性の高い実験が行われていると判断できる。具体的な曲げ特性についてみると、中空管と比較し、中詰材完全充填管は大きい曲率に対しても破壊することなく、高靱性を示していることがわかる。これは中空管では曲げ外力により断面の楕円化（Brazier 効果⁴⁾）が生じ、局部的に座屈を生じてしまうのに対し、中詰材完全充填管では管内の砂粒の集合体が断面形状を円形に保ち、かつ砂粒の可動性により結果として応力再配分効果をもたらすために局所的な変形を生じることなく滑らかな曲がりを実現させているためと説明できる。これが靱性を高めるメカニズムと考えられる。参考までにモルタルを充填した管の曲げ実験も同時に行ったが、靱性の向上はみられなかった。その理由としてモルタルのような連続体では、砂粒の集合体を持つ応力再配分効果を有せず、付着が外れた場合やクラックが生じた場合に応力が集中してしまうためと考えられる³⁾。

また図-6 より、中空管と中詰材完全充填管では、曲率が小さい範囲、つまり $M-C$ 関係が直線的に変化する弾性域での傾きはほぼ一致していることが読み取られる。このことは砂を充填しても管の曲げ剛性にほとんど寄与しないことを意味している。

以上の点は管に砂を充填することにより剛性を高



(a) 中空管



(b) 中詰材完全充填管

図-6 中空管と中詰材完全充填管の曲げモーメントー曲率関係

めることなく高靱性を実現することができることを示唆している。

(2) パイプインパイプの曲げモーメントー曲率関係の比較

図-7 はパイプインパイプの曲げ実験により得られた曲げモーメント M と曲率 C の関係を内管径 40, 30, 20mm と、同条件の中詰材完全充填管（図中で Single に対応）について示したものである。また図-8 は曲げ荷重載荷途中でパイプが変形している様子の写真であるが、いずれの場合も外管の載荷点付近で図-9 のような局部座屈が見受けられた段階で載荷を終了することとした。

図-7 より内管径が大きくなるとともに靱性が向上していることがわかる。この理由は以下のように考えられる。中詰材完全充填管では、管に曲げ外力が与えられると管の剛性と中詰材である砂のせん断抵抗力によりその外力を負担する。しかしパイプインパイプでは内管の剛性も外力をある程度負担し、その傾向は内管/外管径比が大きいほど、つまり本実験の場合では内管径が大きいほどそれが顕著となる。

また荷重除荷後、パイプは外管・内管共に曲率を低下させ、内管については特に径 20mm の場合では最終的に載荷点間での変形がほぼ元に戻る弾力的な挙動が確認された（図-10(a)）。同様に図-10(b)に

示す内管径 30mm の場合においては、外管だけではなく内管にも多少残留変位が生じているものの、外管に比べその変形量は小さく抑制されている。このことはフローラインである内管を保護する役割を中詰材と外管が果たしているということであり、本提案パイプは著者らの期待する性能を発揮していると考えられる。

5. まとめ

本研究では中詰材として標準砂を充填することで、剛性を向上させずに靱性を向上させることを可能とするパイプインパイプ構造を考案し、その基本的な曲げ特性について、室内規模の4点曲げ実験よりその検討を行ったものである。まず中空管と中詰材完全充填管の比較実験から、砂充填により、曲げ剛性は変化せず、靱性が向上することを確認した。またパイプインパイプは同条件で比較した中詰材完全充填管に比べ、更に靱性を向上させ、かつ内管の残留変位を小さくすることができていることがわかった。今回は検討するパラメータとして内径/外径比の違いに焦点を絞ったが、今後は中詰材の性質の違い（粒度分布や含水比など）を検討項目として実験を継続する予定である。また中詰材充填によりパイプの局部座屈を回避できることから、より薄肉のパイプを用いることが可能となり、結果として可撓性と高靱性を両立できる構造形式を可能とすると考えられる。同時に内外パイプの厚さの組み合わせを変化させることでよっても広範囲な曲げ特性を実現可能であることも予想される。このことからパイプ厚による影響も今後の検討パラメータとして考えている。さらに実スケールでの性能を検討すべく、より径の大きいパイプでの曲げ実験も必要となるであろう。

謝辞：本研究の一部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行われたものであります。関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) S. Kyriakides: Buckle propagation in pipe-in-pipe systems, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.39(2), pp.351-392, 2002.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.

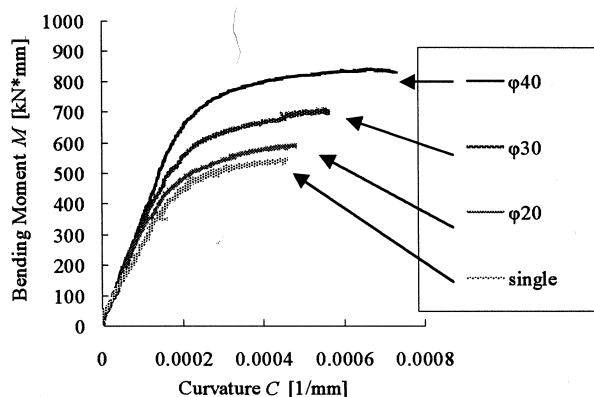


図-7 パイプインパイプの曲げモーメントー曲率関係

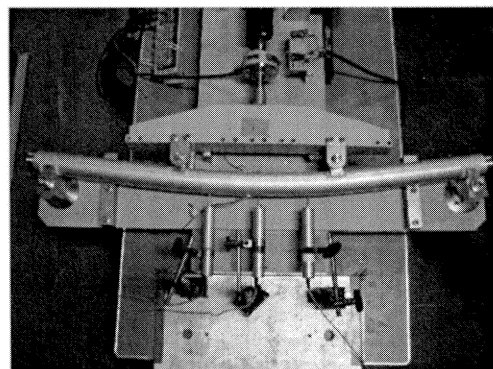


図-8 荷重载荷時におけるパイプ変形の様子

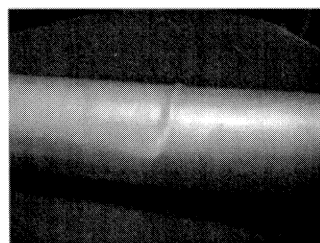
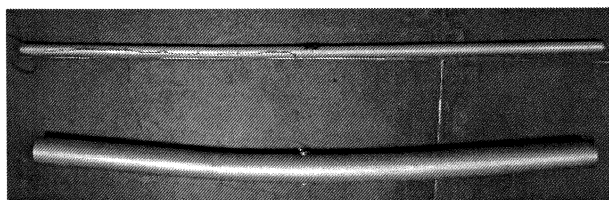
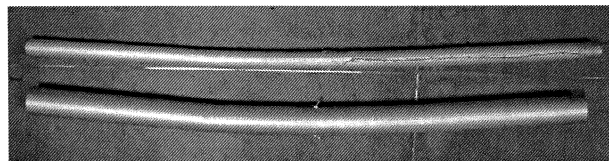


図-9 局部座屈の様子



(a) 内管径30mmのパイプインパイプ
(上側：内管, 下側：外管)



(b) 内管径30mmのパイプインパイプ
(上側：内管, 下側：外管)

図-10 除荷後の内, 外管パイプの変形