

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760662

研究課題名（和文）曲げ特性を容易に制御可能とする新しいフレキシブルパイプインパイプの研究開発

研究課題名（英文）Research and development of Flexibility-controllable structural pipe-in-pipe systems

研究代表者

佐藤 太裕（MOTOHIRO SATO）

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00344482

研究成果の概要（和文）：

本研究は、二重管パイプの間に中詰コアとして砂などの粒状体材料を挿入することにより高靱性を発揮し、かつ中詰コアの物性を変化させることにより曲げ特性を容易に制御可能とする、新しい「フレキシブルパイプインパイプ」の開発を行うことを目的としたものである。研究期間内に理論的、実験的両面から多角的な検討が行われ、本提案形式の優位性が実証された。

研究成果の概要（英文）：

This research aims to develop a brand-new flexibility-controllable structural pipe-in-pipe system. This “sandwich” system consists of outer and inner layer (usually steal) and cores between each layer. The interesting characteristics of this system is that the core is sand or equivalent granular material, which enable us to easily control the bending property of pipes. Both theoretical and experimental investigation have been carried out and the advantage of this system has been shown.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：構造力学、応用力学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学

キーワード：フレキシブルパイプインパイプ、パイプライン、粒状体材料、曲げ特性、座屈、靱性能

1. 研究開始当初の背景

(1) 海洋でのパイプラインの要求性能と従来型パイプインパイプの長所、短所

海洋パイプラインは静的、動的なさまざまな荷重が流体、海底地盤と連成し常時作用する、極めて過酷で予期せぬ崩壊現象が発生し

やすい環境下にある。海洋開発の大水深化、大規模化に伴い、強度や動的安定性について極めて高い性能が要求される近年、申請者は当該研究分野にて世界的に注目を集めるパイプインパイプ構造¹⁾の優位性に着目した英国 Cranfield 大学 M.H.Patel 教授との共同研究により、本構造形式が大水深域での極大静

水圧作用に対し優れた座屈安定性を有することを定量的評価から実証し、その研究成果を Journal of Marine Science and Technology (日本船舶海洋工学会英文論文集) に公表した²⁾。一方で従来型パイプインパイプは中詰材にセラミックやポリマーなど、**単独で優れた性能を発揮しうる材料を用いる**ことで高剛性化、断熱性の向上を図ることから、逆に以下の短所、弊害を有することを明らかにした。

●中詰材の材料費が一般的に高価となってしまう。

●曲げ剛性が大きい構造形式になってしまうため、施工、敷設が容易ではない。

●パイプと中詰材の付着が外れた際、その点に応力が集中し、局所的な崩壊に至ることが多い。このため中詰材の構造特性を活かした靱性の高い構造を施工するのは非常に難しい。

⇒**曲がりにくい**が**壊れやすい**

1) S. Kyriakides: Buckle propagation in pipe-in-pipe systems, International Journal of Solids and Structures, 39(2), 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.

(2) 本研究で開発するフレキシブルパイプインパイプの特長と克服すべき技術課題

(1)にて示した問題点克服のため、研究代表者である佐藤は土木工学的見地から「土質」、「砂質」の力学的性質に着目し、中詰材料として曲げ剛性を有する連続体ではなく、ある程度の**流動性を有するが圧縮力には抵抗する粒状、粉体状の集合体が適している**のではないかと、という着想を得た。この「**中詰材の性能を意図的に下げる**」という逆説的発想により、以下の利点を有することが予想される。

●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、表-1に示す断面の局所的なつぶれ(Brazier効果)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。

2. 研究の目的

本研究は二重管パイプの間に中詰コアとして粒状体材料を挿入することにより高靱性を発揮し、かつ中詰コアの物性を変化させることにより曲げ特性を容易に制御可能とする、新しい「フレキシブルパイプインパイプ」の開発を行うことを目的としたものである。

3. 研究の方法

研究開始前より予備的な室内曲げ実験(パイプ長さ1m, パイプ外径50mm)によりその効果のある程度確認しており、初年度である平成21年度から本格的な実験及び解析的検討を開始した。本年度は最初にパイプ内径やコアの粒径など種々を変化させた曲げ実験を多数実施した。また実験で得られた曲げ特性を再現しうる弾塑性梁モデルや円筒シェルモデルによる構造解析にも取り組んだ。さらに理論的見地から、「多層カーボンナノチューブ」との構造的相似性に着目し、多層構造にみられる各層の力学的役割について、構造力学的に検証を行った。

4. 研究成果

研究期間内に得られた成果を以下に列挙する。

- (1) 内径を40, 30, 20mmと変化させたいずれの場合においても、中空単管パイプに比べ、曲げ作用に対する高靱性を発揮することを確認した。
- (2) 中詰コアとして粒径1mmと0.05mmのガラスビーズを用いて曲げ実験を行った結果、粒径1mmの場合には断面の偏平化が生じてしまい、曲率の小さい段階で破壊に至るケースが見られた。密詰めにならないほどの大きい粒径の場合にはこのことから靱性能向上を期待できない可能性があることがわかった。
- (3) 内外パイプの完全弾塑性を考慮した梁モデルにより、曲率-曲げモーメント関係、および最大曲げモーメントを十分な精度で導出可能であることを確認した。
- (4) 曲げとともにパイプラインの支配外力となり、かつ実験での検証が難しい軸圧縮力に対する座屈特性について解析的な検討を行った。その結果本研究で提案するフレキシブルパイプインパイプ

ブは単管パイプに対して、中詰コアとパイプのヤング係数比を現実的な値の範囲として 0.01 から 0.0001 とした場合、約 1.5 から 5 倍程度の弾性座屈に対する強度を有することがわかった。

- (5) 中詰コアの弾性係数が等しい場合、連続体と粒状体コアでは座屈荷重、座屈波数ともほぼ等しくなる。このことから、著者らが提案する粒状体をコア材とするフレキシブルパイプインパイプは、曲げに対する高靱性を発揮しつつ、軸圧縮に対する座屈強さを従来型のものと比較して失わない構造形式であるといえる。
- (6) 圧縮を受けるパイプの半径に対し、コア厚が 20~30%程度以上ある場合には軸圧縮に対する座屈荷重はほぼ一定値となる。これはコア厚が厚い場合には、単管パイプに対する座屈荷重の増加分はコア厚が全て受け持つことを意味する。
- (7) 近年ナノ科学分野にて世界的に注目を集めるカーボンナノチューブ、特に多数の層が入り子状に連なった多層カーボンナノチューブの構造特性に着目し、本研究にて開発した構造形式との力学的相似性から、外力作用に対する内層、外層がそれぞれ異なる力学的役割を持つことを解析的に明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- 1) S. -J. Park, M. Sato, T. Ikeda and H. Shima: Hard-to-Soft Transition in Radial Buckling of Multi-Concentric Nanocylinders, *World Journal of Mechanics*, Vol.2, No.1, pp.42-50, 2012.
- 2) H. Shima, S. Ghosh, M.Arroyo K.Iiboshi and M. Sato: Thin-shell theory based analysis of radially pressurized multiwall carbon nanotubes, *Computational Materials Science*, Vol.52(1), pp.90-94, 2012.
- 3) M. Sato and K. Shimazaki: Approximate formulation for Bifurcation Buckling Loads of Axially Compressed Cylindrical Shells with Elastic Cores, *Interactions and Multiscale Mechanics*, *An International Journal*, Vol.4(4), pp.313-320, 2011.
- 4) H. Shima, M. Sato, K. Iiboshi, S. Ghosh and M. Arroyo: Diverse Corrugation Pattern in Radially Shrinking Carbon Nanotubes, *Physical Review B*, Vol.82(8), pp. 085401_1- 085401_7, 2010.

- 5) M. Sato, H. Shima and K.Iiboshi: Core-tube Morphology of Multiwall Carbon Nanotubes, *International Journal of Modern Physics B*, Vol.24(1-2), pp. 288-294, 2010.
- 6) 佐藤太裕, 嶋崎賢太: パイプインパイプの軸圧縮座屈に対するコアの力学的役割, *海洋開発論文集*, Vol.26, pp.531-535, 2010.
- 7) 佐藤太裕, 星崎心吾, 蟹江俊仁, 三上隆: 完全没水係留浮体のスナッフ荷重発生メカニズムに関する解析的検討, *海洋開発論文集*, Vol.26, pp.801-805, 2010.
- 8) 佐藤太裕, 渡辺香奈, 白石圭祐, 蟹江俊仁, 赤川 敏: 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, *海洋開発論文集*, Vol.25, pp.737-740, 2009.
- 9) H.Shima and M. Sato: Pressure-induced Structural Transitions in Multi-walled Carbon Nanotubes, *Physica Status Solidi (a)*, Vol.206(10), pp.2228-2233, 2009.

[学会発表] (計 7 件)

- 1) 佐藤太裕, 渡辺香奈, 白石圭祐, 蟹江俊仁, 赤川 敏: 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, *海洋開発シンポジウム*, 平成 21 年 6 月, 横浜市横浜開港記念会館
- 2) 白石圭祐, 渡辺香奈, 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 赤川 敏: フレキシブルパイプインパイプの曲げ特性に関する実験的検討, 平成 21 年度土木学会全国大会第 64 回年次学術講演会, 平成 21 年 9 月, 福岡大学
- 3) 渡辺香奈, 白石圭祐, 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 赤川 敏: 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, 平成 21 年度土木学会全国大会第 64 回年次学術講演会, 平成 21 年 9 月, 福岡大学
- 4) 小渡知己, 白石圭祐, 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 赤川 敏: 土木学会北海道支部平成 21 年度年次技術発表会, 平成 22 年 2 月, 札幌コンベンションセンター
- 5) 佐藤太裕, 嶋崎賢太: パイプインパイプの軸圧縮座屈に対するコアの力学的役割, *海洋開発シンポジウム*, 平成 22 年 6 月, 鹿児島県民交流会館
- 6) 小渡知己, 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 赤川敏: 可塑性材料を充填したパイプインパイプの曲げ挙動に関する実験的検討, 平成 22 年度土木学会全国大会第 65 回年次学術講演会, 平成 22 年 9 月, 北海道大学
- 7) 東 翔太, 小渡知己, 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 赤川 敏: 中詰材を凍結させたフレ

キシブルパイプインパイプの挙動に関する実験的検討, 土木学会北海道支部平成23年度年次技術研究発表会, 平成24年2月, かでる2・7 (札幌市)

〔図書〕 (計1件)

- 1) H.Shima and M.Sato : Elastic and Plastic Deformation of Carbon Nanotubes, Pan Stanford Publishing (Singapore, 2011), 240 pp. ISBN: 978-981431075-8 (in press)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 太裕 (MOTOHIRO SATO)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号 : 00344482

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし