

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420473

研究課題名(和文)人工凍結を利用した「高靱性」パイプインパイプの実用化開発

研究課題名(英文)Development of pipe-in-pipe filled with frozen material for practical use

研究代表者

蟹江 俊仁(Kanie, Shunji)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10332470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：人工凍結を利用したパイプインパイプは、既存材料を使いながらも、弾性域から塑性域まで滑らかな曲げ変形挙動を示し、高い靱性を発揮するものである。本研究の結果、大きな曲げ変形挙動まで追える実験装置の改良が施され、画像処理による変形計測方法の導入により、その変形挙動が仔細に把握できた。実験結果は、中詰材料の特性を反映した靱性の向上を示しており、特に人工凍結させた供試体では、著しい性能の改善が見られた。このような現象を物理的に説明するためのモデル構築にも取り組み、適切なモデルの提案がなされた。これらの成果により、人工凍結を利用した高靱性パイプインパイプの実用化は大きく前進したものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Pipe-in-pipe filled with frozen material can bend smoothly to a large curvature without failure. The authors improved a bending apparatus for experiment to make it follow the bending behavior from elastic to plastic ranges consistently. The measuring method was also improved to observe the large bending curvature by a digital image processing with a high resolution camera. As a result, it was confirmed that the performance of pipe-in-pipe filled with frozen material was drastically improved. The authors proposed numerical models which can evaluate the bending behavior of the pipe-in-pipes, and it becomes possible to explain the effect of filling material on the increase in ductility. The authors are convinced of that the application of pipe-in-pipe to a practical use was enhanced.

研究分野：構造工学、寒地環境工学

キーワード：構造工学 パイプインパイプ 人工凍結 中詰材料 高靱性

1. 研究開始当初の背景

2011年の大震災に伴い、原子力発電所の今後が懸念される中、既存エネルギーの中でも天然ガスの利用に対する社会的関心は高まっており、長期耐久性と信頼性に優れた天然ガスパイプラインネットワークの構築は、今後重要な課題であると考えられる。

我が国の場合、地中埋設型のパイプラインは、動的な地震作用だけでなく、地震後の地盤の塑性変形に対しても十分な靱性を発揮することが期待される。このような構造要求に対し、強度と靱性に優れた新材料を使うのではなく、既存の材料を複合的に使いながら、さらに人工凍結による効果を積極的に活用して、構造物としての高靱性を発揮させる本パイプラインパイプの実用化開発は、信頼性と耐久性を兼ね備えたインフラを経済的に作ることを可能にする画期的アイデアであると考えた。

パイプラインパイプとは、二重管構造のパイプで、外管と内管との間のコアと呼ばれる部分に、充填材を詰めたものである(図-1参照)。

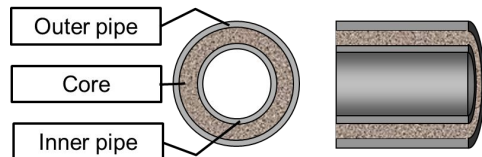


図-1 パイプラインパイプ構造イメージ

これまで、曲げ剛性を増加させる対策として、内部にセラミックスやモルタルなどを充填したものが製品化されてきた。その利用方法としては、大水深域に設けられる石油掘削用のプラットフォームのライザー管など、非常に大きな曲げモーメントの作用を受ける部分で、曲げ剛性と強度を増加させることが目的であった。

しかし提案者らは、コアの部分に砂などの粒状体の可塑性材料を充填することにより、曲げモーメントを受ける区間が滑らかに変形し、高い靱性を発揮することを実験的に確認した。この現象は、内部に充填された可塑性材料が、作用する曲げモーメントの増加とともに断面がつぶれて楕円化する「Brazier 効果」を防止するとともに、もともと曲げ強度をほとんど有しないために、外管の変形を内管に滑らかに伝えるというメカニズムで説明されるものである。

さらに提案者らは、コア部分に水を注入し、人工的に凍結させることにより、より高い靱性の向上が図れることを確認している。これを天然ガスの輸送に用いるパイプラインに適用することを考えれば、天然ガスの温度を水の凍結温度である 0 より若干低く設定する

ことにより、従前には考えられなかった靱性と、大きな許容曲げ曲率が得られることになる。その結果、活断層を跨ぐような区間や、海陸の接続部などにおいて、滑らかで靱性の高いパイプラインが経済的に築造できるようになると考えた。

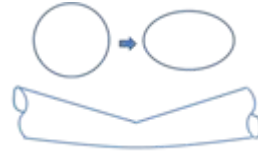


図-2 曲げ変形に伴う Brazier 効果

2. 研究の目的

中詰材を工夫することで優れた特性を発揮するパイプラインパイプの性能を検証し、その挙動を分析するとともに、数理モデルによる評価ができるようにすることが目的である。課題となるのは、従来の一般的材料では実現しえなかった弾性域から塑性域に至るまでの大きな曲げ変形を、連続的かつ包括的に計測ならびに観察できる計測方法を開発すること、乾燥砂といった可塑性材料から、中詰材が凍結した時の状態まで、中詰材に応じた挙動特性を確認すること、さらにその実験結果に基づいて、曲げ挙動を説明できる物理・数理的モデルを構築することである。これらの成果を踏まえて、これまでにない高靱性を有するパイプラインパイプの実用化を目指すものである。

3. 研究の方法

(1) 曲げ変形実験装置の改良と計測方法の開発

著者らはこれまでも中詰材に可塑性材料である乾燥砂を用いた実験などを行ってきたが、中詰材を凍結させた場合には、かなり大きな曲げ変形まで許容することが分かっている。しかし、従前より広く用いられているひずみゲージによるひずみの計測や、ダイヤルゲージによる曲げ変形量の計測では、測定レンジを超えるほどの大きさに達するため、弾性域から塑性域に至るまでの連続的かつ包括的な挙動評価ができなかった。このため、大変形まで一貫して載荷できるように実験装置を改良するとともに、近年特に進歩の著しい高精度一眼カメラによる映像を用いた「画像分析技術」を導入し、パイプラインパイプの曲げ変形挙動が追えるような計測方法の開発を行った。

(2) さまざまな中詰材料による曲げ変形特性の評価

中詰材料には、乾燥砂、モルタル、凍結砂などを用い、上記の曲げ変形実験装置により、曲げ変形挙動を計測ならびに観察することとした。弾性域から塑性域に至る曲げ変形挙動は、中詰材料の違いにより大きく異なってくる。パイプの曲率と曲げモーメントとの関係を追いながら、中詰材料の果たす役割を分析し、次に述べる物理数理モデルの構築につながる構成則の把握を行った。また、中詰材料自体の物性を評価する目的で、単管にこれらの中詰材料を詰めた実験も行い、材料特性の定量化も行った。

(3) 物理数理モデルの構築

パイプインパイプに発生する現象を、物理数理的に説明するためにモデル構築を行った。モデル化にあたっては、パイプ材料そのものの弾性域から塑性域までの応力・ひずみ関係を構築するとともに、中詰材料の力学的挙動評価の方法が課題となる。前者についてはFEMなどの既存の手法をベースに、適切な材料特性を与えることでモデル化を進め、後者については、複数のモデル案を想定して、パイプ自体の曲げ変形挙動との組み合わせの結果、挙動評価に適切と思われるものを選定することとした。

4. 研究成果

(1) 曲げ変形実験装置の改良と計測方法の開発

従前の曲げ変形試験装置に、载荷点間距離を縮め、载荷点や支点での局部座屈を防止するような工夫を加え、大きな曲げ変形にも耐えられるよう改良を加えた。また、画像分析による変位と曲げ曲率分布を計測方法を検討し、载荷点間の曲げ曲率分布まで補間できるような計測方法を確立した。この成果により、曲げ変形が非常に小さい弾性領域から、極めて大きな塑性領域まで、一貫した曲げ変形挙動の計測と観測が可能となった。以下に実験時の写真を示す。



写真-1 载荷前の状態

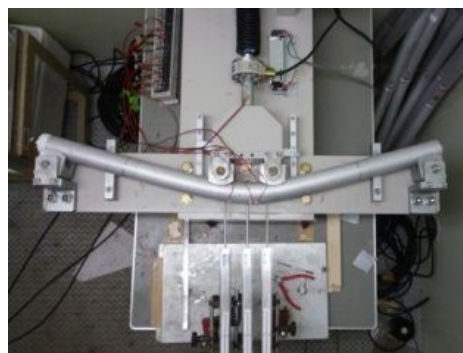


写真-2 実験後の供試体の曲げ変形 (中詰材料に乾燥砂を充填したケース)

(2) さまざまな中詰材料による曲げ変形特性の評価

中詰材料を変えながら曲げ変形特性の違いを確認した。一例として、乾燥砂を詰めた場合の曲げモーメント・曲げ曲率関係を図-3に、また凍結砂を用いた場合の曲げモーメント・曲げ曲率関係を図-4に示す。通常の単管の場合の限界曲率は、0.0005程度であるのに対し、いずれの場合も破壊に至る曲げ曲率が大幅に向上し、靱性が増していることが確認できた。

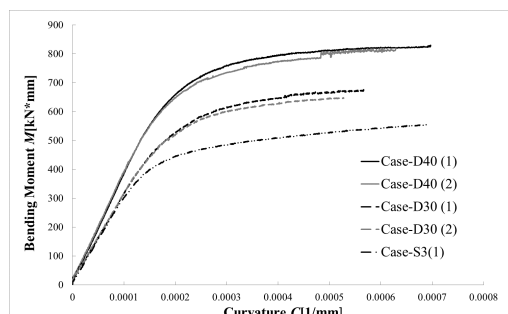


図-3 曲げモーメント・曲率関係 乾燥砂を中詰したパイプインパイプの場合

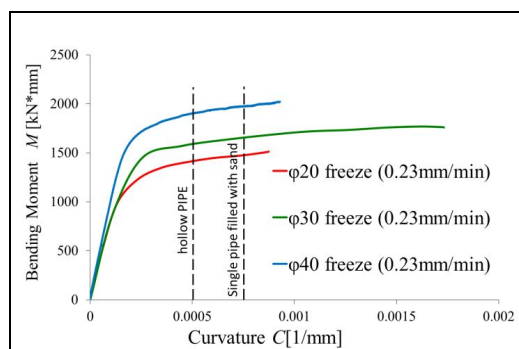


図-4 曲げモーメント・曲率関係 凍結砂を中詰したパイプインパイプの場合

また、中詰材料の果たす役割を見るため、载荷点変位の増加に伴い、曲げ曲率分布がどのように変化するかを分析した。図-5は、画像分析結果に基づく载荷点間の曲げ曲率分布を示している。四点载荷を用いているため、

実験における載荷点間での曲げモーメントは一定となるが、曲率が概ね一定の値を示すのは載荷点変位が4-5mmまでの弾性域までで、その後は中央で曲率が小さく、載荷点付近で曲率が大きくなるような挙動を示すことがわかる。しかし、耐荷力を超えて載荷点変位が30mmを過ぎると、突然中央付近の曲率が大きくなり、破壊が生じている。単管の場合は、弾性域にある時から載荷点中央付近の曲げ曲率が大きくなるため、このような挙動の差は中詰材によりもたらされたものと考えられる。同様の現象は凍結砂の場合でも見られ、中詰材の果たす定性的な役割はこの実験により確認することができたと思う。

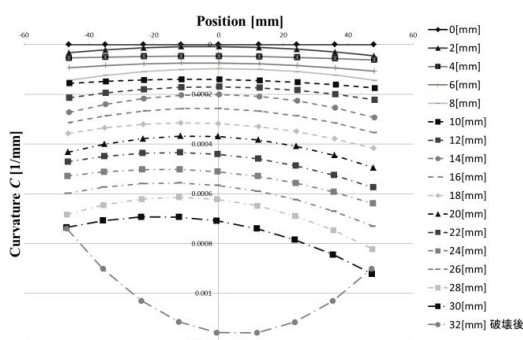


図-5 載荷点間の曲げ曲率分布
乾燥砂を中詰したパイプインパイプの場合

(3) 物理数理モデルの構築

次に、このような現象を説明するための物理数理モデルの構築を行った。まず、パイプ材料自体については、中詰材の影響を受けない単管で曲げ実験を繰返し、応力・ひずみ関係を構築した。これを図-6に示す。

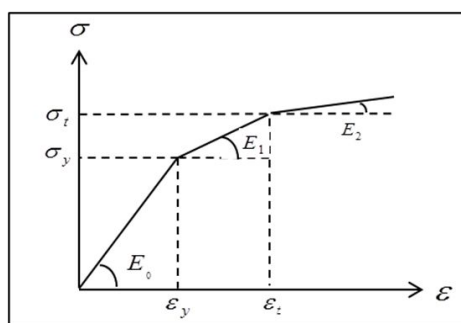


図-6 パイプ材料の応力・ひずみ関係

この応力・ひずみ関係を用いて、パイプにはファイバーモデルを適用し、乾燥砂はWinklerバネで置き換えを行ってモデル化した。乾燥砂充填によるパイプインパイプの断面モデルイメージは図-7の通りである。

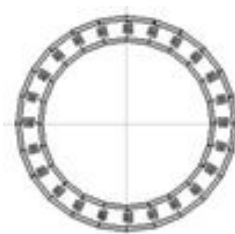


図-7 Winklerバネによる断面モデル
乾燥砂を中詰したパイプインパイプの場合

なお、このモデルにおいてWinklerバネのバネ係数は解析結果に大きな影響を与えるとともに、その物理的な役割を説明する意味でも重要である。そこで、Winklerバネのバネ係数をさまざまに変化させて解析を行い、その効果を確認した。すなわち、その値が0であれば、中詰材としての砂が無い場合と同じであり、単管の曲げ挙動を表すことになる。一方その値が無限大に近づけば、パイプインパイプの内管と外管が中立軸を共有し、同じ曲率で変形することを意味する。乾燥砂を中詰めしたパイプインパイプの場合は、その間の挙動を示すはずであり、Winklerバネのバネ係数を変化させて曲げモーメント・曲率関係を示したものが図-8となる。バネ係数が0の時はほぼ単管の曲げモーメント・曲率関係に近く、バネ係数が100-1,000kN/m程度で、乾燥砂充填パイプインパイプの挙動をほぼ再現できていることがわかる。この値は、良く締め固められた砂質土地盤の地盤反力係数に相当し、締固度95%以上で締め固めた乾燥砂の反力特性を反映したのと考えられる。この結果より、乾燥砂を用いた場合は、その締固度に応じた地盤反力係数を用いてWinklerバネのバネ値を決めれば、本モデルで曲げ挙動が追えるということを示しており、当初目的として掲げた物理数理モデルの構築ができたと考えられる。

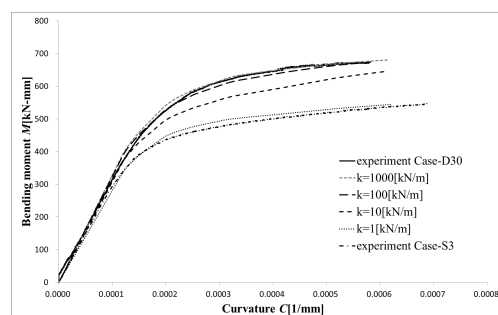


図-8 バネ値を変化させた曲げモーメント・曲率関係

次に凍結砂を用いた場合について考えた。凍結砂の場合は、圧縮と引張で大きく応力・ひずみ関係が異なると考えられ、実験等の結果から、図-9のような応力・ひずみ関係を提案した。

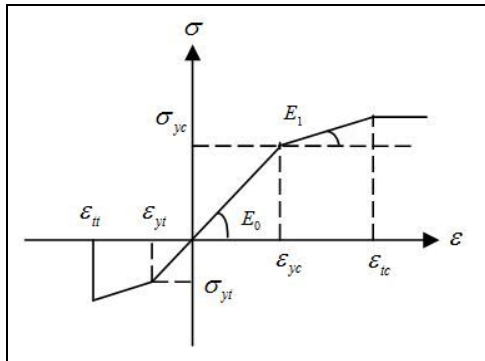


図-9 凍結砂の応力・ひずみ関係

パイプについては、乾燥砂を中詰材料に使った場合と同様、ファイバーモデルでモデル化し、凍結砂は図-9のような応力・ひずみ関係を有するソリッドとしてFEMモデルに組み込んだ。このモデルによる解析結果と実験結果との比較を図-10に示す。

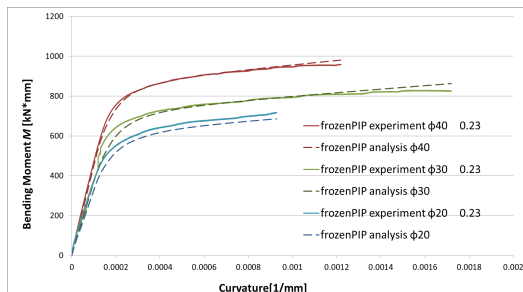


図-10 曲げモーメント・曲率関係
凍結砂を中詰したパイプインパイプの場合

この結果から明らかなように、解析結果と実験結果は非常に良い整合性を見せており、凍結砂を充填した場合でも、本研究成果を用いればその曲げ変形挙動が的確に再現できることが確認できた。

これら一連の研究により、中詰材料を充填したパイプインパイプの挙動が評価できるとともに、高い靱性の力学的説明ができたものとする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Akihiro Hayashi, Yutaka Terada, Shunji Kanie: Development of pipe-in-pipe filled with granular material for flexible and ductile bending performance, *Procedia Engineering*, Vol.95, pp232-240, Elsevier, 査読あり, DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.183, 2014

〔学会発表〕(計 8 件)

岩本太一, 寺田豊, 伊原かすみ, 蟹江俊仁: 画像処理によるパイプの曲げ変形挙動に関する研究, 平成 27 年度年次技術研究発表会, A-46, Vol.72, 平成 27 年度論文報告集, 土木学会北海道支部, 2016.1.30, 北海道大学

寺田豊, 伊原かすみ, 岩本太一, 蟹江俊仁: 画像処理による中詰砂充填パイプインパイプの曲げ変形特性評価, 平成 27 年度年次技術研究発表会, A-47, Vol.72, 平成 27 年度論文報告集, 土木学会北海道支部, 2016.1.30, 北海道大学

伊原かすみ, 寺田豊, 蟹江俊仁: 中詰材の材料特性に応じたパイプインパイプの数値解析モデルの構築と曲げ変形挙動の考察, -564, 平成 27 年度年次学術講演会, 土木学会, 2015.9.18, 岡山大学

Shunji Kanie, Akihiro Hayashi, Yutaka Terada and Hao Zheng: Numerical Analysis of Pipe-in-Pipe Filled with Various Materials, Conference on Pipeline, ASCE, 2015.8.25, Baltimore, USA

林昌宏, 寺田豊, 伊原かすみ, 蟹江俊仁: 凍結砂を充填した高靱性パイプインパイプの力学的挙動解析および曲げ変形メカニズムに関する検討, 平成 26 年度年次技術研究発表会, C-10, Vol.71, 平成 26 年度論文報告集, 土木学会北海道支部, 2015.1.31, 室蘭工業大学

伊原かすみ, 林昌宏, 寺田豊, 蟹江俊仁: モルタルを充填したパイプの曲げ変形挙動モデルの構築, 平成 26 年度年次技術研究発表会, C-11, Vol.71, 平成 26 年度論文報告集, 土木学会北海道支部, 2015.1.31, 室蘭工業大学

寺田豊, 蟹江俊仁, 佐藤太裕: 中詰砂充填による高靱性パイプインパイプの弾塑性挙動評価法, -117, 平成 26 年度年次学術講演会, 土木学会, 2014.9.10, 大阪大学

寺田豊, 蟹江俊仁, 佐藤太裕, 林昌宏: ファイバーモデルによるパイプインパイプの弾塑性挙動評価, 平成 25 年度年次技術研究発表会, A-12, Vol.70, 平成 25 年度論文報告集, 土木学会北海道支部, 2014.2.1, 札幌コンベンションセンター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蟹江 俊仁 (KANIE, Shunji)
北海道大学 大学院工学研究院・教授
研究者番号: 10332470

(2) 研究分担者

佐藤 太裕 (SATO, Motohiro)
北海道大学 大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 00344482