# 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

Comprehensive evaluation on bending behavior of pipe-in-pipe filled with dry sand by using digital image analysis

 $\bigcirc$ 

北海道大学大学院工学院 北海道大学大学院工学院 北海道大学工学部環境社会工学科 北海道大学大学院工学研究院

## 1. まえがき

現代社会の高度化に伴う開発ニーズは、構造物に従前 とは異なる性能を求めるようになってきている.筆者ら が開発を進めてきた可塑性材充填パイプインパイプ(以 下, PIP)は,外管と内管の空隙部に中詰材として乾燥砂 や凍結砂を充填することにより、大きな曲げ応力をパイ プ全体で受容し、より高い靱性と変形追随性を発揮する ものである<sup>1)</sup>. 中詰材として乾燥砂を充填した PIP の解 析においては、外管と内管についてはファイバー要素を 用いて離散化を行い、乾燥砂を Winkler バネで置換する ことにより、実験と整合性の非常に良い結果を得た.こ のことにより、弾性域から塑性域への変曲点付近に発生 すると考えられる外管と内管の曲率のずれを解析的に評 価することが可能になるなど、乾燥砂充填 PIP の曲げ変 形挙動を適切に再現することができた、しかしながら、 従前の曲げ実験における変形計測は、パイプ中央部の引 張・圧縮部に貼り付けたひずみゲージのみに依存してお り,パイプ軸方向の曲率分布を定量的に評価するには至 らなかった.

これに対し,近年デジタルカメラの画素分解能の向上 に伴い,画像処理によって構造物の弾塑性挙動を,弾性 域から塑性域まで一貫して高精度に評価できるようにな ってきている.そこで本研究では,曲げ変形の観測方式 として画像処理による方法を採用し,パイプ軸方向の曲 率分布も含めた,より詳細かつ包括的な変形観測を実施 し,実験結果と既存の解析モデルによる解析結果の比較 を通じて,乾燥砂充填 PIP の曲げ変形挙動評価を行うこ ととした.

# 実験およびファイバーモデル解析の概要 2-1.実験概要

供試体として、パイプはアルミニウム合金を用い、中 詰材として豊浦標準砂を用いた、外管径 50.0[mm]、内 管径 40.0[mm]の二重管を用いることとする.中詰され た豊浦標準砂の乾燥密度は 1.58[g/cm<sup>3</sup>]となった.

荷重載荷装置により,1.0[mm/min]の速度で荷重を連 続的に載荷し,ロードセルによりその荷重を計測する. また,供試体に変位計測点としてのシールを貼り,変位 平面に対して垂直な方向からのデジタルカメラ撮影によ り,その全体的な変位性状を計測する(図-1,図-2).



図-1: 実験写真



図-2: 載荷条件

学生員	寺田 豊	(Yutaka Terada)
学生員	伊原かすみ	(Kasumi Ihara)
学生員	岩本 太一	(Iwamoto Taichi)
フェロー	蟹江 俊仁	(Shunji Kanie)

本実験では、パイプ中央区間に直径 5.0[mm]のシール を 7.5[mm]間隔で 9 枚貼り付け、変位点として扱うもの とした. 9 点の変位点から、(1)の変位関数における各係 数を決定し、(2)の曲率分布関数を導くものとする.

$$y = ax^{4} + bx^{3} + cx^{2} + dx + e$$
(1)  
$$C = -12ax^{2} - 6bx - 2c$$
(2)

# 2-2. 解析モデル概要

本研究において,実験結果との比較に用いた解析モデ ルにおける断面モデルと応力ひずみ関係を図-3 に示す.





## 図-3:二重管 Winkler モデル

断面内はファイバー要素を用いて,円周方向に 24 分割され,各微小要素にはパイプの応力ひずみ関係が入力 されている.また,中詰材である乾燥砂は外管と内管の 応力伝達は担うものの,軸方向における曲げ剛性の向上 には寄与しないと考えられるので,Winkler バネで置換 した.解析モデルの詳細は,参考文献を参照されたい<sup>2)</sup>.

#### 実験と解析結果

実験における再現性の高さと二重管 Winkler 解析モデルとの整合性を確認するため、実験と解析結果の曲げモーメント - 曲率関係を図-4 に示す.



図-4:曲げモーメント - 曲率関係

実験結果は、曲率分布における中央点の曲率とロード セルにより計測された荷重から換算される曲げモーメン トを用いて、載荷点変位が 1.0[mm]間隔のものをプロッ トしている.解析結果は実線を用いて示している.供試 体として用いた乾燥砂充填 PIP は、中空単管よりも大き な曲げ変形を許容しており、期待された性能を発揮した ものと思われ、再現性高く実験できたと考えられる.ま た、解析は実験結果と良い整合性を示しており、本実験 結果と解析結果を比較、検討することは妥当であると言 える.実験結果の弾性域から変曲点付近において、曲率 の増加に対し、曲げモーメントの増加がより大きくなる 箇所が見受けられ、このような部分に外管と内管の塑性 化や中詰材である乾燥砂の影響があると考えられる.

## 4. 曲率および曲げモーメント分布

画像処理により求められた PIP のパイプ軸方向の曲率 分布を図-5 に、また、その曲率分布から二重管 Winkler モデル解析を用いて推定された曲げモーメント分布を図 -6 に示す. 各図の凡例は、載荷点変位を示し、図-5,6 の 各実線、破線は互いに対応している.



まず,図-5 に示した曲率分布を見ると,曲率の小さ い弾性域付近においては,ほぼ一定の曲率分布を見せる ものの,塑性域に向かうにつれて,中央点付近で低く載 荷点付近で大きくなる傾向を示すことがわかる.一方図 -6 は,観測された曲率から,二重管 Winkler モデルを用 いて推定された曲げモーメント分布を表している.これ によれば,比較的変形の小さな段階では,中央点付近で 小さく載荷点付近で大きな曲げモーメントを呈した(例 えば載荷点変位 2.0[mm]の状態)直後に平準化される (載荷点変位 4.0[mm]の状態)というような挙動を複数 回繰り返すことが分かる.これは、載荷に伴って生じる 中詰乾燥砂の塑性的変形効果によるものと思われ、外管 と内管の変形が中詰砂の作用によって馴染むまで、こう した挙動が断続的に繰り返されるものと考えられる.な お、さらに変位が進んだ塑性域に入ってからは、ほぼ一 定の曲げモーメント分布を示すようになる.以上より、 パイプの塑性化は載荷点付近で先行するものの、中詰砂 の効果により外管と内管の曲げ応力の負担割合が断続的 に変化しながら、最終的には全体として滑らかな曲げモ ーメント分布を示すようになることが判明した.

### 5. 外環と内管の曲率のずれについて

前項でも論じたように,外管と内管の間では中詰砂を 通じた応力伝達により断続的な曲率のずれが生じている ことが予想された.そこで,本解析モデルで採用してい る Winkler バネの載荷方向の変形量から,外管と内管の 曲率のずれを見ることとした.これを図-7 に示す.



# 図-7:外管と内管の曲率分布

実線が外管の,破線が内管の曲率分布を示している. 外管と内管は,弾性域においては,同一曲率を保つものの,載荷点付近において塑性化が発生し始める載荷点変位 8.0[mm]の付近より,内管の曲率が外管に対しより小さくなる傾向を示し始めることが分かる.また,この曲率のずれは,降伏点付近の載荷点変位 10.0[mm]から 16.0[mm]において顕著に現れるようになる.パイプ全体において曲げ剛性の低下がみられるようになる,載荷点変位 20.0[mm]以降では,中央点において内管の曲率が 外管に対して大きくなり,載荷点付近においては外管の 曲率の方が大きくなるといった傾向を示している.

#### 6. まとめと今後の展望

本研究では、内管径 40.0[mm]の乾燥砂充填 PIP に対 し、曲げ変形の観測・評価に画像処理方式を適用した実 験を行い、二重管 Winkler モデルによる解析結果と比 較・検討を行った.その結果、PIP 全体の曲げ変形挙動 の評価が可能になるとともに、これまで不可能であった 内管の曲率分布の推定も可能となった.今後は、外管と 内管の連成効果や中詰材である乾燥砂の挙動について、 さらに詳細な検討を行う予定である.

#### 参考文献

 Kanie, S., Akihiro, H., and Yutaka, T., Development of pipe-in-pipe filled with granular material for flexible and ductile bending performance, proceeding of SCESCM, 2014
2) 蟹江俊仁, 佐藤太裕, 林昌宏, 寺田豊: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, 平 成 26 年度, 土木学会, 年次報告書, 第 69 号, I-117