

数値近似による中詰材充填パイプインパイプの塑性変形評価

Numerical Approximation on Plastic Bending Behavior of Pipe-in-Pipe filled with Sand

北海道大学大学院工学院 ○学生員 笹 祐也 (Yuya Sasa)
北海道大学大学院工学研究院 フェロー 蟹江 俊仁 (Shunji Kanie)
北海道大学大学院工学研究院 正 員 佐藤 太裕 (Motohiro Sato)
北海道大学工学部 学生員 林 昌宏 (Akihiro Hayashi)

1 はじめに

天然ガス等のエネルギー資源は、凍土地帯に大量かつ未開発の状態が存在しており、その多くは地中埋設パイプラインを用いて輸送される。しかし、地盤変動が頻発する地域や断層を有する地帯、あるいは不連続凍土地帯にパイプラインを建設する場合、地盤の振動や凍上によるパイプの曲げ変形、パイプの破損等の問題が生じている。昨年までのパイプ載荷実験によって、中空単管パイプに外力を加えた場合、Brazier effect と呼ばれるパイプの断面が楕円化する現象によって、パイプに局所的な破壊が起きてしまうことが報告されていた。それを防ぐための手法として、パイプインパイプ(以下PIP)構造(図-1参照)を選択し、中詰材に砂を用いて、様々な実験を行ってきた。ここで、中詰材に砂を用いることの利点について述べておく。中空単管と砂詰単管の実験比較において、砂詰単管の方はパイプの剛性にほとんど寄与することなく靱性のみを高めることができ、パイプ材料が持つ本来の強度までパイプの使用を可能にするということがわかった。したがって、PIPの中詰材に砂を用いることによって、滑らかに曲がるパイプが実現できるのではないかと考えた。本研究では、PIP構造のパイプに外力がかかる場合、弾性理論解に加え、これまでされていなかった塑性域についての評価を解析的に求め、実験結果との比較検討を行った。

2 実験概要

実験の載荷装置の概略図を図-2に示す。載荷点、支点共に2点の4点載荷試験であり、支点載荷点間距離 L : 390mm、載荷点間距離: 120mm、変位計間距離: 50mm。ロードセルを一定の速度(1.0mm/min)で回すことによってパイプに荷重を加え、等間隔に設置した変位計(3点)、パイプに貼り付けたひずみゲージ(外管、内管共に引張・圧縮側の中央に2点)から、荷重、変位量、ひずみをそれぞれ出力する。ロードセルによる荷重の値が下がった時点でパイプが破壊したとみなし、載荷終了とした。計測された荷重からパイプにかかる曲げモーメント M を、変位量とひずみから曲率 C をそれぞれ求め、 $M-C$ 関係を求める。また、実験に用いた供試体だが、材質はアルミ、外管、内管共に管厚は1mm、全長1000mmで、その他の情報については表1に示す。充填する砂はすべて豊浦標準砂を用い、いずれの場合もパイプの外側からハンマーで叩き締めを行うことによって、約 1.60g/cm^3 の高い密度を保つようにした。また、端部にはめたエンドキャップが蓋の役割と共に PIP 構造の保持を担っている。

3 PIP 解析モデルの定式化

3.1 Tri-linear 型応力-ひずみ関係の導入

はじめに、PIP 解析モデルを作成するにあたって、基盤となる中空単管の解析モデルの $M-C$ 関係を求めていく。図-3に示したのは、中空単管実験の結果(Case1-(1))から求めた応力-ひずみ関係である。これを基に、実験に用いた単管アルミパイプの材料特性を決定していく。図-3に示した応力-ひずみ関係を定式化するために、3本の直線で表される Tri-linear 型応力-ひずみ関係(図-4参照)を仮定し、応力と曲げモーメントの関係から単管パイプの $M-C$ 関係を求める。また、ここで諸元の選択について説明しておく。図-5にパイプ断面におけるひずみ分

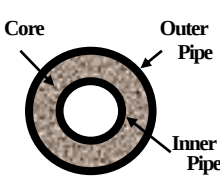


図-1 PIP 断面図

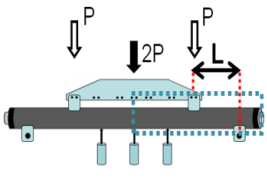


図-2 載荷装置概略図

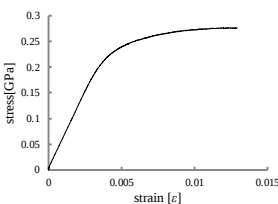


図-3 中空単管実験から求めた 応力-ひずみ関係

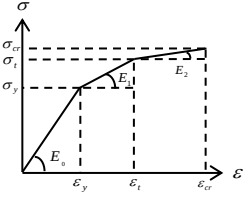


図-4 Tri-linear 仮定型 応力-ひずみ関係

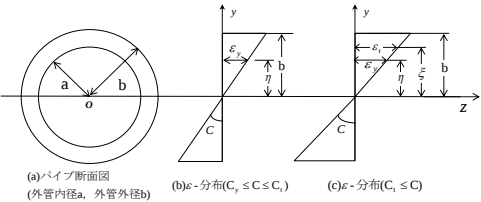


図-5 パイプ断面におけるひずみ分布

表1 実験に用いた Case 毎の諸元

ケース番号	名前	パイプ構造	中詰材	外管外径	内管外径	実験数
Case1	中空単管	単管	なし	50mm	なし	2
Case2	φ40PIP	PIP	砂	50mm	40mm	2
Case3	φ30PIP	PIP	砂	50mm	30mm	2
Case4	φ20PIP	PIP	砂	50mm	20mm	2

布を示す。図中の C_y と C_t は、材料特性の決定に用いた ε_y と ε_t がそれぞれ外縁の値になった際の曲率の値を示している。3つの弾性係数 E_0 , E_1 , E_2 ならびに限界ひずみ ε_y , ε_t , ε_{cr} の設定に当たっては、中空単管による曲げ試験結果を用いてデータフィッティングすることで決定することとした。

3.2 数値近似

3.1 で求められた単管パイプの $M-C$ 関係であるが、今後、解析を進めていく上で、中立軸のずれや中詰材の影響等、様々な対処すべき課題が考えられる。そのため、断面のモデルが複雑になった場合にも対応できるモデルの構築が必要とされる。そこで、新たに提案するのが数値近似モデルである。数値近似モデルに用いた断面図と関係式を図-6 に示す。数値近似の計算過程は、理論解を図-6 式(1)のように変換し、分割数 n 、要素番号 i とし、要素と図心のなす角 $d\theta(0 \sim \pi/2)$ で分割し、要素高さ dy_i を求め、そこから要素の面積 A_i 、中立軸からのアーム長 y_i をそれぞれ求める。また、ある曲率 C のときのひずみ ε に対する要素の平均応力 σ_i を図-4 より求める。算出した σ_i , y_i , A_i をそれぞれ掛け合わせて、断面全体の和(上下対称のため上部の計算値を2倍している)を計算したものが曲げモーメント M になるというものである。ここで、誤差に関して論じておくと、分割数を90以上に設定すると、面積誤差が0.3%未満になり、また、 $M-C$ 関係を比較してもほぼ一致していることが確認されている。

3.3 データフィッティング

次に、解析モデルから得られた式を実験データに近づけるために、データフィッティングを行った。この手法は、実験結果と数値近似で求められた曲げモーメントの誤差が最小になるように最小二乗法によって諸元を決定するというものである。これによって得られた諸々の諸元は、 $E_0=60.0\text{GPa}$, $E_1=10.7\text{GPa}$, $E_2=1.02\text{GPa}$, $\varepsilon_y=0.00311$, $\varepsilon_t=0.00556$, $\varepsilon_{cr}=0.0131$ となっている。また、図-7 見ると、理論解と実験データがほぼ一致しており、かなり精度の高いフィッティングが行われたことがわかる。また、破壊曲率の予測に関しては現段階ではできていないため、実験値を使用した。尚、フィッティングに用いた実験データについてだが、中空単管の実験データ4点の中から平均的な挙動を示したものの (Case1-(1)) 一つを選択した。

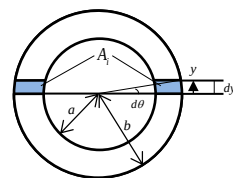
4 重ね合わせと実験結果

最後に、PIP の $M-C$ 関係を作成する。過去の実験から、中詰材に砂を使用したとき、パイプの剛性にほとんど寄与しないということがわかっていった。したがって、3 で求めた中空単管パイプの解析モデルと、それを内管パイプモデルに変換したものを、それぞれ重ね合わせることで、PIP 解析モデルを作成できるのではないかと考えた。その結果と、同じ断面を持つ PIP 実験結果(各 Case, 2点ずつ)を比較したものを図-8 に示す。また今回は、外管と内管の曲率が等しく変化していくことに加え、内管の位置が全く変化しないことを仮定している。それぞれの PIP 解析結果はかなり実験結果に近い $M-C$ 関係を再現できてい

ることが読み取れる。しかし、すべての場合において、弾性域の直線部分の傾きを大きく見積もっており、後半部分では最大曲げモーメントについて過小評価をしていることが読み取れる。

5 まとめ

単管パイプに砂を詰めることによって、パイプの剛性に寄与することなく靱性のみを高めることがわかったので、それを基に PIP の $M-C$ 関係を作成することができた。PIP の解析結果と実験結果の誤差の原因であるが、現在考えられるものとして、「中立軸のずれ」と「内管と外管の曲率の差異」が挙げられる。「中立軸のずれ」については、曲率が増加していくと、内管の位置が元の位置に固定されないことによって起きるので、解析モデルへの導入については現在検討中であり、「曲率の差異」については、内管の曲率に一定の割合を掛けることで解消されるのではないかとと思われる。



$$M = \int \sigma y dA$$

$$= 2 \sum_{i=1}^n \sigma_i y_i A_i$$

図-6 数値近似変数と解析に用いた式(1)

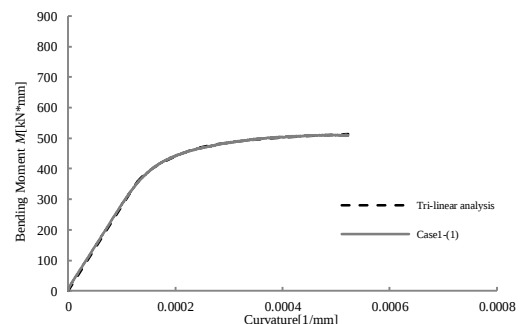


図-7 フィッティング結果

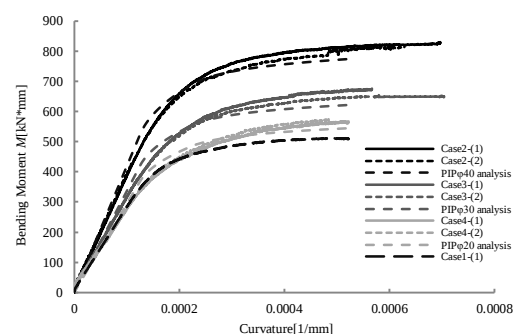


図-8 PIP 実験結果と理論解と単管比較

参考文献

- 1) 白石圭祐：フレキシブルパイプインパイプの曲げ特性に關する実験的検討，北海道大学大学院工学研究科寒冷地建設工学講座構造システム研究室，2010。
- 2) 小渡知己：可塑性材料を充填したフレキシブルパイプインパイプの開発，北海道大学大学院工学院北方圏環境政策工学専攻構造システム研究室，2012。