

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

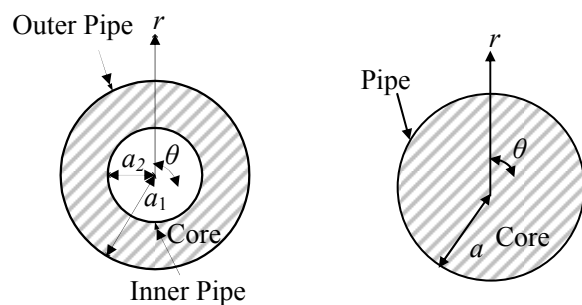
北海道大学大学院工学研究科 学生員 ○白石圭祐
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 佐藤太裕
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 嶋崎賢太
 札幌市役所 田中邦憲
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 蟹江俊仁
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 赤川 敏

1. まえがき

永久凍土地帯からの天然ガス安定供給を実現するための天然ガス輸送技術に資する構造安定性の高いパイプライン設計法を確立するために、永久凍土境界部での曲げ応力の低減という大きな技術的課題が指摘されている。これに対処するための「高圧に耐え得るフレキシビリティの高いパイプ」は、必須の要素技術の一つでありながら、要求仕様を満足するものは現存していない。そこで中詰材として砂や粒状体など流動性の高い可塑性材料を入れることにより、変形拘束性、応力伝達性能を向上させ、その結果として要求される曲げ特性や座屈に強い、パイプインパイプ構造¹⁾(図-1(a))を有する、新しいフレキシブルパイプを開発するべく、実験、解析両面から研究を開始した。本研究ではその基礎資料を得るべく、中詰材を充填したパイプ(図-1(b))の曲げ特性を実験・解析両面の結果を比較する事によって、中詰材とパイプの相互作用により発揮される性能を評価することを目的としている。

2. 理論解の導出

本研究では図-2に示すようなパイプの曲げに対し中詰材のひずみエネルギーを考慮することにより、相互作用効果による曲げモーメントを導出する。この際、曲げ外力作用時に曲げモーメント最大となる位置で断面の「つぶれ」により変形が局所化する可能性が高い。これは断面2次モーメントの減少により、弾性理論により得られる許容曲げモーメント値よりも小さな値で曲げ破壊を起こすことを意味する(Brazier effect²⁾)。これより中詰材は等方性を有する弾性体(ヤング係数 E_C 、ポアソン比 ν_C)、パイプ(管厚 t 、半径 a)は中詰材に比べて非常に薄い弾性体(ヤ



(a) パイプインパイプ (b) 中詰材充填パイプ

図-1 断面図

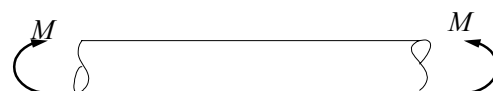


図-2 パイプの曲げ

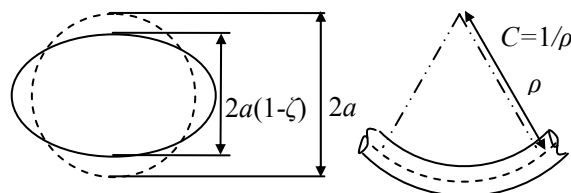


図-3 断面のつぶれ 図-4 曲率

ング係数 E_P 、ポアソン比 ν_P)として扱い、2次元平面ひずみ状態と中詰材とパイプの付着は完全である事を仮定する。また実際には同時に進行していくと考えられる軸方向の曲率の増加と断面のつぶれをひずみエネルギー導出の際はそれぞれ独立に求めている。断面のつぶれは長さ方向に曲率が生じない状態で図-3のように円から楕円につぶれていくと仮定し、もとの円の直径から楕円の短軸方向に減少した長さの割合を楕円化率 ζ とする。曲率の増加は図-4のように断面が変化せずに長さ方向に曲率 C の均一な円弧状の曲がりが生じるとする。このとき ζ

キーワード：パイプ、曲げ、可塑性材、Brazier 効果
 連絡先：〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
 TEL 011-706-6176 FAX 011-706-6174

北海道大学大学院工学研究科

は一定である．以上の仮定より弾性体を充填したパイプの単位長あたりのひずみエネルギーは式(1)で表される³⁾．

$$U = \frac{1}{2} C^2 E_P \pi a^3 t \left(1 + \frac{\alpha a}{4t} \right) \left(1 - \frac{3}{2} \zeta + \left[\frac{5}{8} \zeta^2 \right] \right) + \frac{3}{8} \pi E_P \frac{t}{a} h^2 \zeta^2 + \frac{\pi}{4} \alpha \beta E_P \zeta^2 a^2 + \frac{\pi}{16} \alpha \beta E_P C^2 a^4 \quad (1)$$

ここに $\alpha = E_C/E_P$, $h = t/\sqrt{1-\nu_P^2}$
 $\beta = 3 - 5\nu_C/(1+\nu_C)(1-2\nu_C)$, $\beta' = \nu_C^2(5-2\nu_C)/(1+\nu_C)(1-2\nu_C)$.
 式(1)の第1項はパイプと中詰材の曲げ, 第2項はパイプの断面変化, 第3項は中詰材の断面変化, 第4項は曲げ時のポアソン効果による中詰材の断面変形の防止に対応したひずみエネルギーである．また式(1)は $E_C=0$ で中空状態に対応する．式(1)の[]内の項は無視し得る²⁾ので, ひずみエネルギー極小の状況である $\partial U/\partial \zeta = 0$ より ζ を C の関数で表せる．この ζ を式(1)に代入し, カスティリアノの定理より $M = dU/dC$ を考えると曲げモーメント M を C の関数として表現でき, その式を理論解として用いる．

3. 考察と結果

実験的検討を行う際の供試体は, 弾性体としてモルタル ($E_C=25\text{GPa}$), 可塑性体として標準砂, パイプ ($a=25\text{mm}$, $t=1\text{mm}$) にアルミニウム ($E_P=70\text{GPa}$) を想定している．この際式(1)での弾性体とパイプのヤング係数の比は $\alpha = E_C/E_P = 0.357$ である．実験形式は図-5のように4点荷重による曲げを生じさせる方法を採用しており, 曲げモーメントはロードセルから得られた荷重から, 曲率は3箇所の変位計の計測値からそれぞれ換算している．

図-6は中空時と弾性体充填時の理論解と中空時, モルタル充填時, 標準砂充填時の実験結果を曲げモーメントと曲率の関係で表している．中空時の2回の実験においてはほぼ完全に $M-C$ 挙動, 破壊時の曲率, 破壊形式が一致しており, この実験の再現性の高さを確認する事ができる．初期の挙動は中空, モルタル充填時, 標準砂充填時の三種類すべてが中空時の理論解と酷似している．破壊時の曲率はモルタル充填, 中空, 標準砂充填の順に大きくなっていき, 標準砂充填時は高い靱性を有している事が伺える．また標準砂充填時は2種類の傾きの異なる線形挙動も示した．モルタル充填時も中空時の理論解と一致しているように見えるが, 実際にはモルタルの圧縮破壊時のひずみから得た曲率 ($C=2.4 \times 10^{-6}/\text{mm}$) の付

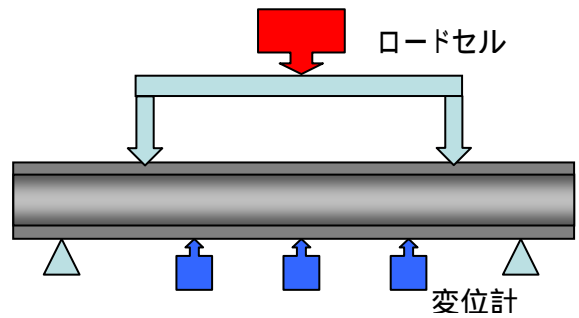


図-5 曲げ実験概略図

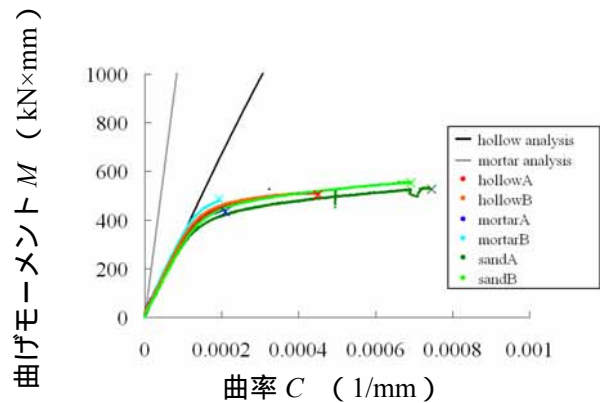


図-6 曲げモーメント 曲率関係

近までは比較的弾性体充填時の理論解に近い挙動を示し, その後は中空時の理論解に近づいていく．上記の曲率付近でモルタルの圧縮・引張両側は破壊してしまい曲げに抵抗しなくなったためと考えられる．この他弾性体充填時の理論解に一致しない理由としては供試体作成時にパイプ内をすべてモルタルで満たす事ができなかった事やパイプとモルタルの付着が外れている可能性が挙げられる．

4. 結論

実験結果と理論解の比較によって可塑性体を充填した鋼管は塑性域が広くなり高い靱性を持つ事を確認した．

参考文献

- 1) 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) C. R. Calladine: Theory of Shell Structures -16 The Brazier effect in the buckling of bent tubes, pp 595-625(31), Cambridge University Press (March 31, 1989)
- 3) Karam, G.N. and Gibson, L.J.: Elastic buckling of cylindrical shells with elastic cores - I. Analysis, International Journal of Solids and Structures, Vol.32, No.8/9, pp.1259-1283, 1995.