

中詰材を充填した鋼管の曲げ特性に関する解析的検討

Analytical investigation of bending properties for steel pipes with elastic cores

北海道大学工学部

北海道大学大学院工学研究科

北海道大学大学院工学研究科

北海道大学工学部

北海道大学大学院工学研究科

北海道大学大学院工学研究科

○ 学生員 白石圭祐 (Keisuke Shiraishi)

正 員 佐藤太裕 (Motohiro Sato)

学生員 嶋崎賢太 (Kenta Shimazaki)

田中邦憲 (Kuninori Tanaka)

正 員 蟹江俊仁 (Shunji Kanie)

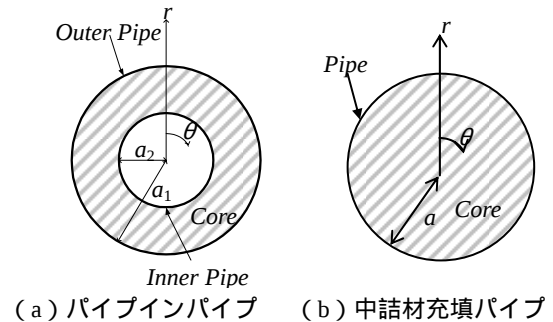
正 員 赤川 敏 (Satoshi Akagawa)

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。これを実現するための「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。著者らは、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ている。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))の曲げ特性を解析的に検討し、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. 解析モデル

本解析では図-2に示すようなパイプの曲げに対し中詰材が果たす役割を解析的に検討する。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⁾)。本研究では曲げによる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限界曲げモーメントを導出する。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(ヤング係数 E_P 、ポアソン比 ν_P)として扱い、非常に長いパイプラインとして、2次元平面ひずみ状態を仮定する。また実際には同時に進行していくと考えられる曲率の増加と断面のつぶれを別々の挙動にわけた仮定をひずみエネルギー導出の際は用いる。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 は一定である。



(a) パイプインパイプ (b) 中詰材充填パイプ

図-1 断面図

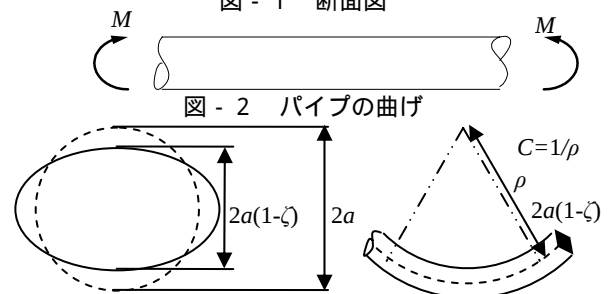


図-2 パイプの曲げ

図-3 断面のつぶれ

図-4 曲率の発生

3. 定式化

中詰材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⁾。

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

$$\alpha = E_C / E_P, \quad h = t / \sqrt{1 - \nu_P^2}$$

$$\beta = 3 - 5\nu_C / (1 + \nu_C)(1 - 2\nu_C), \quad \beta' = \nu_C^2 (5 - 2\nu_C) / (1 + \nu_C)(1 - 2\nu_C)$$

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。 $E_C=0$ で中空状態に対応する。

ここで、式(1)の[]内の項を無視し、ひずみエネルギー極小の状況である $\partial U / \partial \zeta = 0$ を考えると 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 の関数として表せる。曲率、曲げモーメントの無次元量をそれぞれ $c = Ca$ 、 $m = M/E_P a^2 t$ とすると m 、 ζ は式(2)~(3)のように表せる。

$$m = M / E_p a^2 t = \pi \left[1 + \frac{1}{4} \left(1 + \frac{\beta'}{2} \right) \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right) - \frac{3}{2} (1 - \nu_p^2) \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right. \\ \left. \times \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right) \right\}^2 \left\{ 1 + \frac{2}{3} \beta (1 - \nu_p^2) \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right)^3 \right\}^{-1} c^2 \right] \\ \zeta = c^2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 (1 - \nu^2) \left\{ \left(1 + \frac{1}{4} \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right) \right) \right\} / \left\{ \left(1 + \frac{2}{3} \beta (1 - \nu^2) \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right)^3 \right) \right\} \quad (2)$$

式(2)の最大値を $dm/dc=0$ より求めると、限界曲げモーメント点での m 、 c 、 ζ は式(4)～(6)のようになる。

$$m_{\text{Brazier}} = \frac{2\sqrt{2}}{9} \pi \left(\frac{a}{t} \right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 - \nu_p^2}} \left\{ 1 + \frac{2}{3} \beta (1 - \nu_p^2) \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right)^3 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$c_{\text{Brazier}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(\frac{a}{t} \right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 - \nu_p^2}} \left\{ 1 + \frac{2}{3} \beta (1 - \nu_p^2) \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right)^3 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \times \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(1 + \frac{\beta'}{2} \right) \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right) \right\}^{\frac{3}{2}} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right) \right\}^{-1} \quad (5)$$

$$\zeta_{\text{Brazier}} = \frac{2}{9} \left[1 + \left\{ \frac{\beta'}{8} \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right) \right\} \right] / \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{E_C}{E_p} \right) \left(\frac{a}{t} \right) \right\} \quad (6)$$

4. 解析結果と考察

本研究では実験の検討を行なう際の供試体として中詰材にモルタル ($E_C=25\text{GPa}$)、パイプ ($a=50\text{mm}$ 、 $t=1\text{mm}$) にアルミニウム ($E_p=70\text{GPa}$) を想定しており、この際 $\alpha=E_C/E_p=0.357$ である。中詰材の有無、またはパイプと中詰材のヤング係数の比の変化によって限界曲げモーメントとその時点での楕円化率にどのような違いが生じるかを検証することを目的とする。そのため式(2)、(3)において $a/t=50$ のまま、中空状態を含む各 α 値における m 、 ζ をそれぞれ図 - 5、6 にプロットした。

図 - 5 は各 α 値における c と m の関係を表している。各線の●印が限界曲げモーメント点である。中空時と中詰材充填時では m が約 10^{-10} 倍になっており中詰材はパイプの曲げ耐力に大きく影響することがわかる。

図 - 6 は各 α 値における c と ζ の関係を表している。各線の●印が限界曲げモーメント点である。各 α 値による限界曲げモーメント点での ζ はほぼ変化していないといえ、中詰材の存在はより大きな曲げモーメントに対して断面のつぶれを防ぐ効果があることがわかる。

また限界曲げモーメント点での中空時と各 α 値での中詰材充填時の状況を比較するため、式(4)～(6)による各 α 値における値を中空時の値で除したものを表 - 1 にまとめた。表 - 1 から中詰材の存在がパイプの限界曲げモーメント、その時点での曲率を大きく増加させることと、その上昇率に対して楕円化率(断面のつぶれ)をほとんど変化させないことが読み取れる。

5. まとめ

本解析ではパイプの曲げに対し中詰材が果たす役割をひずみエネルギーを考慮することで導出された限界曲げモーメントを用いることで解析的に検討した。しかしながら実際には、パイプの曲げ挙動において断面のつぶれ

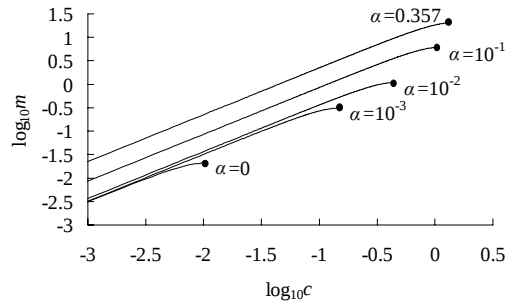


図 - 5 各 α 値における m と c の関係

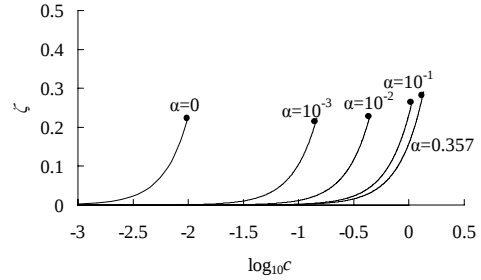


図 - 6 各 α 値における ζ と c の関係

表 - 1 限界曲げモーメント点での m 、 c 、 ζ 値の中詰材充填時と中空時の比

	$\frac{m_{\text{Brazier}}}{m_{\text{Brazier hollow}}}$	$\frac{c_{\text{Brazier}}}{c_{\text{Brazier hollow}}}$	$\frac{\zeta_{\text{Brazier}}}{\zeta_{\text{Brazier hollow}}}$
$\alpha=0.357$	980.49	136.91	1.31
$\alpha=10^{-1}$	295.86	108.53	1.21
$\alpha=10^{-2}$	52.80	45.029	1.04
$\alpha=10^{-3}$	15.02	14.77	1.00

の局所化によって構造安定性を著しく減少させる局部座屈が限界曲げモーメント点より早く生じることも予測される。そのため今後の方針としては局部座屈状況についての検討、中詰材を可塑性体としたときの定式化、実験との検証を行う。それらを基礎資料とした上で、最終的には目的とする中詰材に可塑性材料を用いたパイプインパイプ構造の曲げ特性の解析を行う予定である。

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) Brazier, L.G.: On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections, Proceedings of the Royal Society of London A116, pp.104-114, 1927.
- 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.