

曲管の大変形特性の パイプファクターによる定式化

高田 至郎¹・小川 安雄²・小口 憲武³・北野 哲司⁴
松本 真明⁵・岡村 一男⁶・藤田 周亮⁷

¹フェロ-会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1)
²正会員 大阪ガス㈱ 技術部 (〒541-0046 大阪市中央区平野町 4-1-2)
³工修 東京ガス㈱ 導管部 (〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20)
⁴工修 東邦ガス㈱ 供給管理部 (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町 19-18)
⁵正会員 工修 住友金属工業㈱ エネルギーエンジニアリング 技術部 (〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11)
⁶工博 住友金属工業㈱ 総合技術研究所 (〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8)
⁷正会員 工修 住友金属工業㈱ エネルギーエンジニアリング 技術部 (〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11)

曲管を含む配管系に大変形を生ずるような荷重が作用すると曲管部に変形が集中するため曲管の変形特性の把握が必要である。曲管の変形特性については、弾性域では挙動が明確に把握されているが、曲管が塑性化する大変形時の挙動については研究途上である。

そこで、ガス導管に用いられる多種多様の曲管を対象に大変形弾塑性解析を実施し、曲管の大変形挙動の把握を行った。また、任意の曲管について曲げ変形時の最大曲げモーメント値をパイプファクターを用いて定式化した。この計算式を使えば任意の曲管を含む配管系の大変形挙動を簡易な計算手法で把握することが可能となる

Key Words : gas pipe line, bending pipe, large deformation, FEM analysis, pipe-factor

1. はじめに

曲管を含む配管系に曲げ荷重が作用すると曲管部に変形が集中するため、配管設計にあたり曲管の挙動を把握することが重要となる。曲管が弾性変形領域の場合は挙動が明確に把握されており、曲管のたわみ係数や応力集中係数を用いて設計が行われている¹⁾。しかし、曲管が塑性変形領域の場合の大変形挙動については研究途上であり、その設計法は確立されていないのが現状である。

埋設ガス導管が液状化による側方流動を受けた場合の変形について、著者らは変形が大きくなる箇所に塑性ヒンジが発生するモデルを用いて、簡便な計算式で変形量を算出する手法を提案している²⁾。この手法では曲管部を塑性ヒンジとして扱っており、ヒンジとしての抵抗力を把握しておく必要がある。

一般的にガス導管に用いられるスムーズベンド管（以下、曲管という）には高周波曲管とマンドレル曲管があり、本研究ではこれらを対象にFEM解析を行い、多種多様な曲管サイズの曲げ特性（曲げモーメント-曲げ角度）を把握した。また、曲管の特性を表すパイプファクターを用いて解析結果の整理を行い、任意の曲管の最大抵抗曲げモーメント値の推定式を定式化した。

2. 解析条件

曲管の大変形挙動特性を把握するために、表-1に示す一般的にガス導管によく使われている曲管を対象範囲とし、面内に曲管が閉じる方向に変形する場合（以下、内曲げという）と曲管が開く方向に変形する場合（以下、外曲げという）の2種類の曲げ解析を行った。曲管の外径、管厚、曲管角度、曲率半径及び材質を種々変化させた組み合わせで、解析は全部で43ケース実施した。

解析条件を表-2に示す。ガス導管に用いられる曲管は製法の違いにより高周波曲管とマンドレル曲管の2種類が存在するため、それぞれの特徴を調査して管厚分布をモデル化した。FEM解析コードはABAQUSを使用し、解析モデルのメッシュは1積分点、7積分層数の4節点非線形シェル要素を採用した。解析モデル図を図-1に示す。

表-1 曲管の解析対象範囲

項 目	範囲
導管の外径	100A～750A
外径管厚比 (D/t)	15～60
曲管の曲がり角度 (θ)	45°, 90°
曲管の曲率半径 (R)	1.5・D, 3・D
材質	STPG370, X42～X65

表-2 解析条件

1. 曲管部の管厚	1) 高周波曲管 管径、材質によらず偏肉率は、+20%（腹側）、-15%（背側） 以下の算定式により、曲管部の管厚をモデル化する。 $t_0 = \frac{t_n}{0.85}$ $t = \frac{R \times t_0}{R + r_m \times \cos \theta}$ t_n ; 公称管厚 r_m ; 平均半径 R ; 曲率半径 θ ; 右図のとおり 曲管断面 天 90° 腹 180° 背 0° 地 270°
	2) マンドレル曲管 管径、材質によらず偏肉に一定の傾向はなく全体的に±10%の管厚のばらつき 以下の算定式により、曲管部の管厚をモデル化する。 $t = t_0 = t_n \quad t_n ; \text{公称管厚}$
2. 直管と曲管の境界部分の管厚	1) 高周波曲管 : 曲管側 2 要素（約 60mm）と直管側 2 要素（約 60mm）で補間 2) マンドレル曲管 : 補間はしない
3. 応力-ひずみカーブ	・ 規格最小値モデルとし、 ひずみ 0.5% 規格降伏応力 ひずみ 5% 規格引張強度 } とする。
4. 内圧	周方向応力が $0.4 \sigma_y$ となる内圧とする。
5. 直管長さ（袖管、直管）	$L=5D$ とする。（図-1 参照）
6. モーメントアーム長	$L=10D$ 相当とする。（図-1 参照）
7. 直管管端部の取り扱い	剛体はりを付ける。
8. モデル分割数	1/4 モデルとする。
9. メッシュ分割	周方向半周 24 分割とする。軸方向は図-1 のとおりとする。
10. 曲げ角度定義	高周波曲管は 1D、マンドレル曲管は 1.5D の位置で採取する。

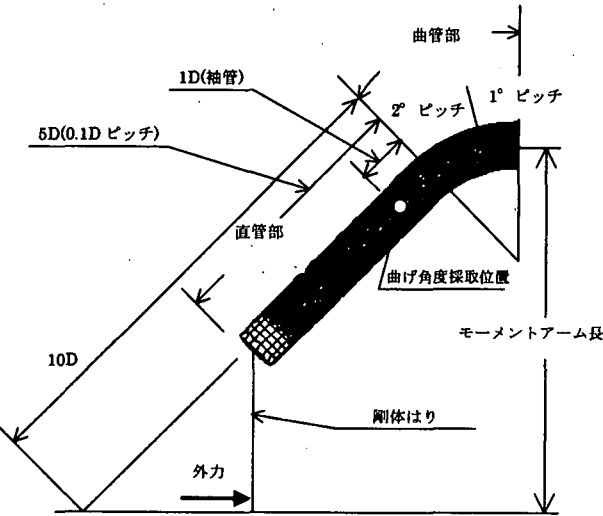


図-1 解析モデル図 (600A, 高周波曲管, 内曲げ)

2. 解析結果

曲管の変形特性として曲管に負荷したモーメントMと曲管に発生した曲げ角度 ω の関係（以下M- ω 関係という）を調査した。図-1に示すように曲げモーメントMはモーメントアーム長と外力の積として算出し、曲げ角度 ω は曲げ角度採取位置の節点の回転角から算出した。解析結果の一例として高周波曲管（600A, 11.lt, 3DR, X52）とマンドレル曲管（600A, 11.lt, 1.5DR, X52）の内曲げ、外曲げのM- ω 関係を図-2に示す。内曲げに比べ外曲げの方が最大モーメントは大きくなっており曲げ剛性が大きいことがわかる。これは曲げ荷重に対して曲管断面が扁平化するが外曲げの場合は曲げ荷重に対して最も剛性が大きくなる方向に扁平化するためである。

次にすべての解析ケースにおいて、曲管部の曲げモーメントの最大値 M_{max} に関してパイプファクターhで整理を行った。 M_{max} は降伏モーメント M_y で除して無次元化した。パイプファクターh、降伏モーメント M_y の定義は次式のとおりである。

$$M_y = \sigma_y \cdot Z \quad ; \text{降伏モーメント}$$

$$\sigma_y \quad ; \text{降伏応力}$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{D^4 - (D - 2 \times t)^4}{D} \quad ; \text{断面係数}$$

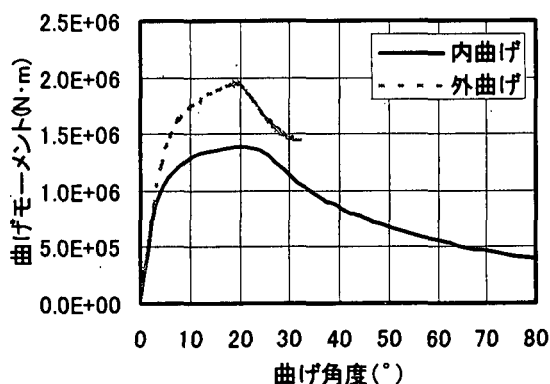
$$h = \frac{t \times R}{r_m^2} \quad ; \text{パイプファクタ}$$

$$D \quad ; \text{曲管外径}$$

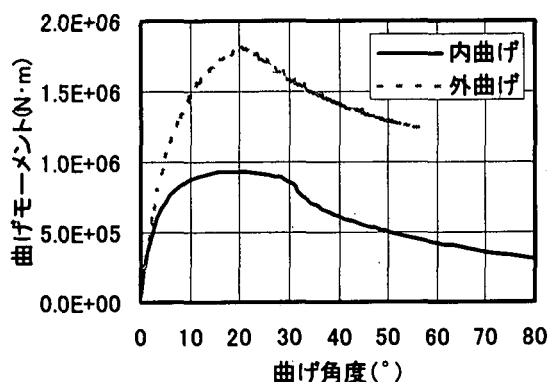
$$t = t_0 \quad ; \text{曲管の管厚}$$

$$R \quad ; \text{曲管の曲率半径}$$

$$r_m = \frac{D - t}{2} \quad ; \text{曲管の平均半径}$$



(a) 高周波曲管 (600A×11.1t×3DR)



(b) マンドレル曲管 (600A×11.1t×1.5DR)

図-2 曲げモーメント-曲げ角度関係

FEM解析を実施した43ケースの解析結果について、最大曲げモーメント $M_{\max}$ を降伏モーメント M_y で除した $M_{\max}/M_y$ とパイプファクタ h の関係を図-3に示す。高周波曲管とマンドレル曲管の任意の曲管が一次近似式で回帰が可能である。ただし、図-3に示すマンドレル曲管の外曲げについては相関がよくないのでさらに検討を加える。

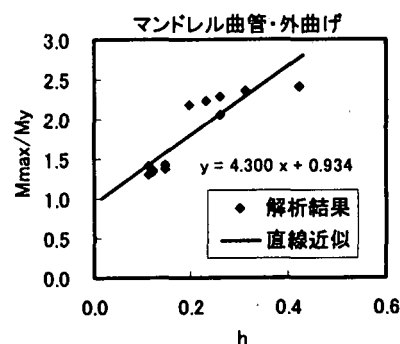
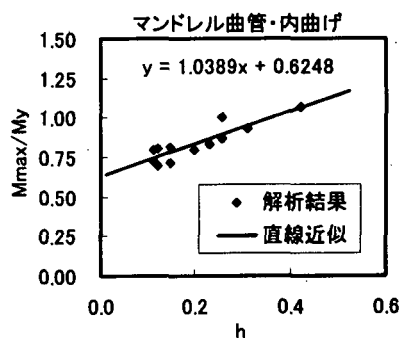
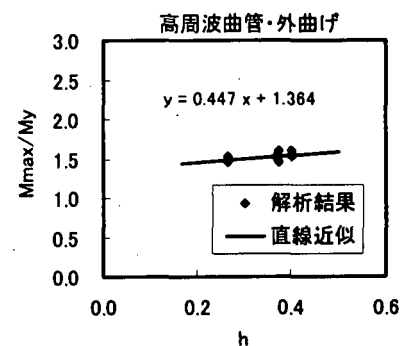
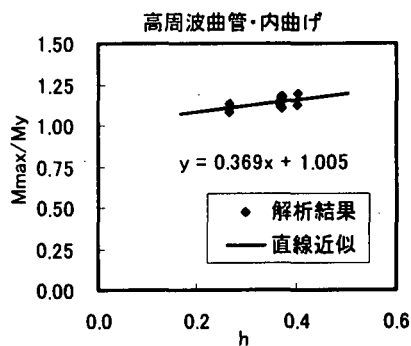
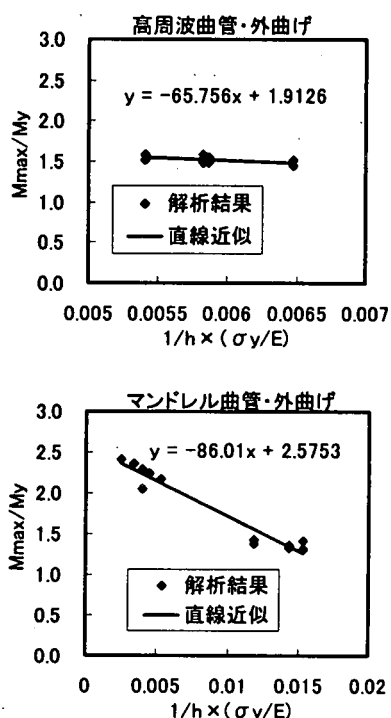
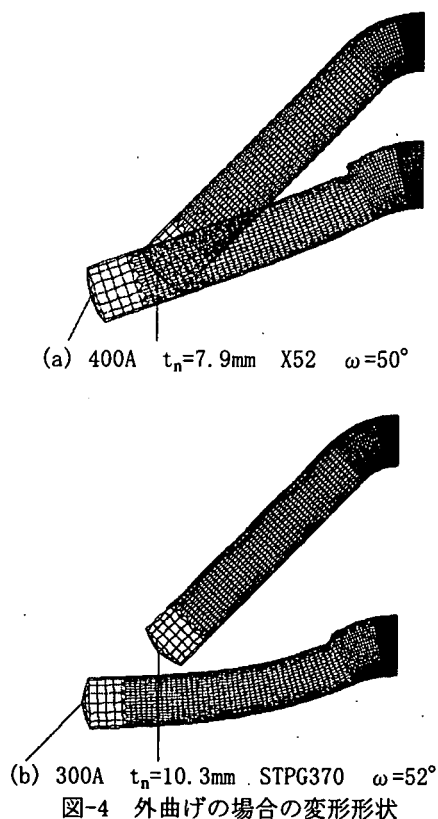


図-3 $M_{\max}/M_y$ - h の関係

3. 曲げ特性データの検討

マンドレル曲管外曲げのケースでは、パイプファクタのみでは十分に整理できていない。この原因を検討するため、外曲げのケースについて変形形状を調査した。図-4に変形形状を示す。これらを見ると曲管付近で座屈が発生する場合(図-4(a))と直管のたわみが大きく発生する場合(図-4(b))があることがわかる。外曲げでは曲管部の剛性が大きくなるため、直管部の座屈やたわみといった挙動により変形モードの差異が発生していることが考えられる。そこで座屈の発生に影響すると考えられる降伏ひず

みの影響を考慮して外曲げ変形の場合は $\{ (1/h) \times (\sigma_y/E) \}$ で $M_{\max}/M_y$ を整理しなおした結果を図-5に示す。図-5に示すように一次近似式で良好な回帰が得られた。上記の図-3および図-5より任意の曲管に対して、その寸法と材質が決まればその曲管の最大抵抗モーメントの値が推定できる。この推定式は非線形はり解析や変形計算式を使って曲管の大変形挙動把握するのに多に活用される。



5. まとめ

曲管の最大曲げモーメントは、内曲げではパイプファクター h で、外曲げではパイプファクターと降伏ひずみを用いた $\{ (1/h) \times (\sigma_y/E) \}$ で整理が可能である。曲管の最大曲げモーメント値の推定式を表-3に示す。この推定式により任意の曲管の曲げ抵抗値が簡単に算出でき、曲管を含む配管系の大変形挙動に対する設計において、はり解析や変形計算式等での簡便な計算手法に用いることが可能となる。

表-3 最大曲げモーメントの推定式

		推定式
内曲げ	高周波曲げ管	$M_{\max} = M_y (0.369h + 1.005)$
	マンドレル曲管	$M_{\max} = M_y (1.039h + 0.625)$
外曲げ	高周波曲げ管	$M_{\max} = M_y \left(-65.76 \frac{1}{h} \frac{\sigma_y}{E} + 1.913 \right)$
	マンドレル曲管	$M_{\max} = M_y \left(-86.01 \frac{1}{h} \frac{\sigma_y}{E} + 2.575 \right)$

謝辞：本研究は通商産業省（現経済産業省）資源エネルギー庁が（社）日本ガス協会に委託し、平成8年度～平成12年度の5ヵ年で実施された「ガス導管液状化対策調査」の研究成果の一部をまとめたものであり、関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) ASME B31.8, GAS TRANSMISSION AND DISTRIBUTION PIPING SYSTEMS
- 2) 鈴木他：液状化による側方流動を受ける埋設鋼管の塑性ヒンジ解析，土木学会論文集，投稿中