

鋼管曲管部の大変形挙動に関する FEM 解析を用いた検討

神戸大学工学部 FEM-会員 高田至郎 住友金属工業(株) 正会員 松本真明
大阪ガス(株) 正会員 小川安雄 住友金属工業(株) 正会員 田島知治

1. はじめに

地震時の液状化に伴う大規模な地盤変状が、ガス導管の埋設されている地域で発生すると、ガス導管は、地盤の流動の影響を受け大きく変形し、塑性変形を起こす。この時、ガス導管の変形は、曲管部に集中することが考えられ、曲管部の大変形特性を把握することは重要な課題である。そこで、本研究では、鋼管曲管部の大変形特性について、FEM 解析を用いて検討を行った。

2. SHELL 要素を用いた大変形解析

本研究では、鋼管曲管部の大変形挙動の把握のため、FEM 解析によるケーススタディを行い、その結果から、曲管の大変形特性を把握する手法について検討した。解析の対象とする鋼管は、高圧ガス導管を対象とし、表 1 に示す一般的にガス導管によく使われている曲管（エルボ及びベンド管）とした。変形形態については、面内内曲げ及び面内外曲げとした。検討には、汎用 FEM 解析コード ABAQUS を用いた。

鋼管曲管部の FEM 解析による大変形解析を行った研究は多くなされており、例えば、細川等¹⁾は実験結果と解析結果の比較を行い FEM 解析により実験を再現できることを明らかにしている。また、三木等²⁾は種々の汎用解析ソフトを用いて比較検討を実施し、大変形領域でも解析コード間で整合性のある結果が得られることを確認している。これらから、大変形領域に至る FEM 解析手法は確立されているといえる。そこで、本研究では、図 1 に示すように、曲管部を SHELL 要素でモデル化し、外力として鋼管モデル端部に取り付けた剛体はり要素の片端に強制変位を、曲管が内曲げもしくは外曲げする方向へ与える解析を行った。

曲管の変形特性を明らかにするために、全てのケースに対して、上記のモデルを用いて FEM 解析を実施した後、図 2 に例として示すように、モーメント-曲げ角度関係（以下、M- 関係と表記）を整理した。図 2 にも明らかなように、内曲げ変形・外曲げ変形ともモー

メントは最大モーメント M_{max} に達するまでは単調に上昇し、その後、低下する。このモーメント低下は、断面全域が完全な塑性状態に至ることにより発生する。そのため、この最大モーメントは、全塑性モーメントと捉えることが出来る。この全塑性モーメントは、曲管の曲げ外力に対する限界耐力であり、塑性変形時の曲管の剛性の一つの指標といえる。このことから、解析を行った全ケースに対して、この全塑性モーメントを採取した³⁾。この値を、曲管の撓みやすさの指標であるパイプファクタ h および降伏モーメント M_y を用いて定式化を試み、任意の曲管における全塑性モーメントを算出することが可能な式を導出した。

表 1 曲管の検討対象

項目	範囲
曲管の外径 (D)	100A ~ 750A
外径管厚比 (D/t)	15 ~ 60
パイプファクタ (h)	0.113 ~ 0.423
曲管の角度 (°)	45°, 90°
曲管曲率半径 (R)	1.5・D (マンドレル曲管) 3・D (高周波曲管)
材質	JIS STPG 370 API-5L X 42 ~ X 65

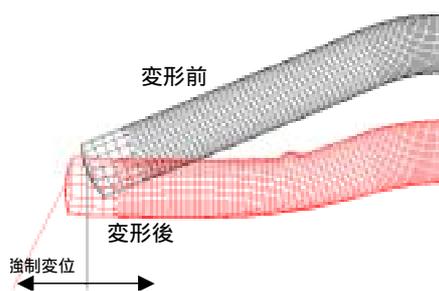


図 1 解析事例(外曲げ)

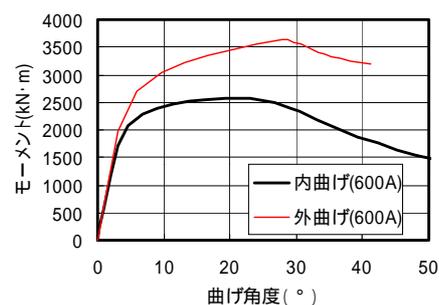


図 2 M- 関係結果事例

キーワード 曲管変形特性, 大変形解析, 全塑性モーメント

〒590-0831 大阪府堺市出島西町 2 番地 住友金属工業(株) TEL: 072-241-7481

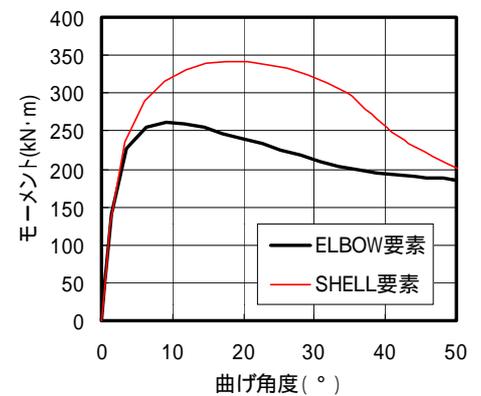
その結果が表 2 である。ここで、パイプファクタ $h=R \cdot t/r^2$ (R : 曲管曲率半径, t : 曲管管厚, r : 曲管半径) であり、降伏モーメント $M_y = \sigma_y \cdot Z$ (σ_y : 曲管の降伏応力, Z : 曲管の断面係数) である。このように、大変形時の曲管の限界耐力についても、弾性域と同様にパイプファクタにより整理が可能であることが明らかになった。大変形時の曲管変形特性のうち、ここで検討した全塑性モーメントのみならず、 M - θ 関係そのものが把握可能となれば、その変形特性を、はり解析や変形計算式などに持ち込むことで、簡易な大変形計算が可能になるものと考えられる。

表 2 全塑性モーメント算出式

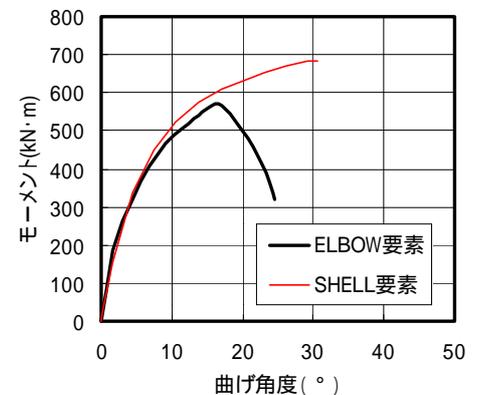
		推定式
内曲げ	高周波曲管	$M_{\max} = M_y (0.369 h + 1.005)$
	マンドレル曲管	$M_{\max} = M_y (1.039 h + 0.625)$
外曲げ	高周波曲管	$M_{\max} = M_y \left(-65.76 \frac{1}{h} \frac{\sigma_y}{E} + 1.913 \right)$
	マンドレル曲管	$M_{\max} = M_y \left(-86.01 \frac{1}{h} \frac{\sigma_y}{E} + 2.575 \right)$

3. ELBOW 要素を用いた大変形解析

汎用 FEM 解析プログラム ABAQUS には、ELBOW 要素という、直管はり要素とほぼ同様の取り扱いでモデル化でき、かつ、円断面の断面変形を考慮できる要素が用意されている。SHELL 要素と比較すると容易にモデル化できることから、構造解析検討に用いるには適した要素と考えられる。そこで、前節と同様の解析をこの ELBOW 要素を用いて行い、SHELL 要素での結果と比較を行った。この検討は、管径; 406.4mm、管厚; 9.8mm の鋼管を対象とした。内曲げおよび外曲げ変形時の M - θ 関係の解析比較結果を図 3 に示す。ここに示すように、外曲げで曲げ角度 15° 、内曲げで 3° 程度までは、よく一致しているが、それ以降は差異が大きくなる。ELBOW 要素の最大モーメントは、SHELL 要素の 75~85% 程度である。断面変形形状を確認すると、ある程度の断面変形は ELBOW 要素でも再現できているが、断面変形がより大きくなると SHELL 要素での変形形状と差異が出てくる。このことから、ある程度の断面変形のレベルまでは、ELBOW 要素による曲管変形解析が可能であり、大変形解析に適用可能といえる。ただし、この適用可能範囲については、今後さらに検討する必要がある。



(a) 内曲げ変形時



(b) 外曲げ変形時

図 3 ELBOW 要素の検討

<参考文献>

- 1) 細川直之, 谷口部洋, 渡辺孝仁: 大口径ガス導管用鋼性曲管の面内曲げ変形の特長, 構造工学論文集 Vol.46A, pp.17-24, 2000
- 2) Miki C., Kobayashi T., Oguchi N., Uchida T., Suganuma A. and Katoh A.: Deformation and Fracture Properties of Steel Pipe Bend With Internal Pressure Subjected to In-plane Bending, CD-ROM, 12WCEE, 2000
- 3) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 岡村一男, 藤田周亮: 曲管の大変形特性のパイプファクターによる定式化, 第 26 回地震工学研究発表会, 2001