

曲管の大変形特性に関する実験及び解析

吉崎浩司¹・安藤広和²・小口憲武³

¹正会員 工修 東京ガス(株)基礎技術研究所破壊力学チーム (〒105 港区芝浦 1-16-25)

²正会員 工修 東京ガス(株)基礎技術研究所地盤工学チーム (〒105 港区芝浦 1-16-25)

³工修 東京ガス(株)基礎技術研究所破壊力学チームリーダー (〒105 港区芝浦 1-16-25)

曲管の大変形特性について、管径及び内圧をパラメータとした面内内曲げ実験を行い、併せてシェル要素を用いた3次元有限要素解析を実施した。その結果、限界まで曲げた状態で発生するひずみは20%以上となったが、その段階においても亀裂や漏洩等はなく、十分な可とう性を有することが確認された。また発生ひずみと曲げ角度の関係については、内圧の有無にかかわらず管径に依存しないこと、また内圧により、内圧なしと比較して相対的に発生ひずみが小さくなることを確認した。更にその挙動を数値解析で再現することにより、解析手法の有効性を確認した。

Key Words : earthquake, buried pipe, elbow, lateral ground displacement, large deformation, plastic strain, finite element method, nonlinear analysis, large strain

1. 緒言

液状化による側方流動が発生した場合、その変位量は数メートルに及ぶことがある。このような地盤変状領域に曲管部を含むガス導管が埋設されていた場合、地盤の移動方向が管の軸方向と等しい領域では地盤と管の間に滑りが生じる¹⁾のに対し、管の軸直角方向では作用する拘束力²⁾が大きく、地盤の変位に伴い管もある程度追従する。その結果、曲管部付近に変形が集中し、同部に大きなひずみを生じる可能性がある。そのため、埋設ガス導管の側方流動等の地盤変状に対する耐震性を評価する際には、曲管の大変形特性を把握することが不可欠である。

曲管の大変形領域での曲げ変形特性について扱った研究としては、地震を想定した極低サイクル疲労特性を評価したものも含めて幾つかある^{3)~7)}が、いずれもひずみの計測は数%にとどまっており、それ以降の限界状態までの挙動は漏洩の有無や扁平量の確認程度のものが大半である。

そこで、曲管の面内内曲げ実験を行い、大ひずみ領域までの計測を行うと共に、更にその挙動を数値解析で再現することにより、定量的に曲げ変形特性を明らかにした。

曲げ実験を実施した。曲率半径は1.5DR、材質はSTPT370 (JIS G3456)とした。口径は、表1に示すように、100A、200A及び300Aとした。

表1 実験に用いた供試体

呼び径	100A	200A	300A
外径 (公称値)	114.3mm	216.3mm	318.5mm
板厚 (実測値)	5.4mm	6.8mm	7.4mm
管径管厚比 (D/t)	21.2	31.8	43.0

実験装置とその状況を図1に示す。供試体は、曲管の両側に長さ2.5Dの直管(材質:SGP、JIS G3452)を溶接により接続し、曲管の扁平が拘束されないように配慮した。実験装置への供試体の設置の際には、面内の回転のみとなるよう固定し、一端に対し油圧ジャッキにて荷重・変位を付加して実験を行った。

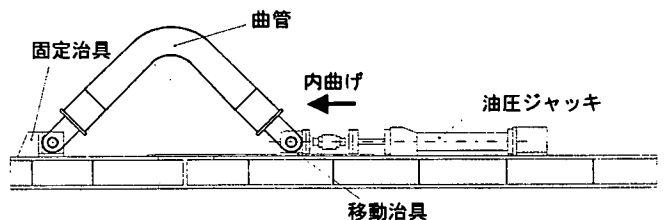


図1 実験装置

2. 実験及び有限要素解析

(1) 実験条件

中圧導管 (内圧 1.0kgf/cm²~9.9kgf/cm²) に一般に用いられる曲管 (JIS B2312) を対象として、面内内

内圧については、漏洩を確認するため、中圧導管の最低使用圧力である1kgf/cm²のみを室素にて付加したケース (以下「内圧なし」とする)、及び中圧導管の

最高使用圧力である $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ を水圧にて付加したケース（以下「内圧あり」とする）について実験を実施した。内圧ありの場合、変形に伴う内容積の変化が圧力に敏感に反応するため、アキュムレータ及びバルブの開閉により一定値になるよう調節した。また、内圧ありの場合には限界まで曲げた状態で漏洩が確認されなければ、更に $20\text{kgf}/\text{cm}^2$ まで昇圧し5分間保持することで気密性を確認した。

計測については、ロードセル、変位計、圧力計及びひずみゲージを設置または貼付することでデータを収録した。ひずみゲージは、図2に示すように曲管の3断面に対して貼付したが、特にひずみが局所的に卓越する部分には、300Aで最小2.5度間隔、100A及び200Aでは5度間隔としたため、計測は計200箇所となった。なお、ゲージについては10%程度が測定限界であるためこの限界値に達した箇所を貼り替えることにより、曲管の変形限界までのひずみ測定を可能にした。

併せて、図中に示すA-A'断面（以下、中央断面とする）については、三次元変位計を用いて、扁平化等に伴う断面形状の変化を断続的に測定した。

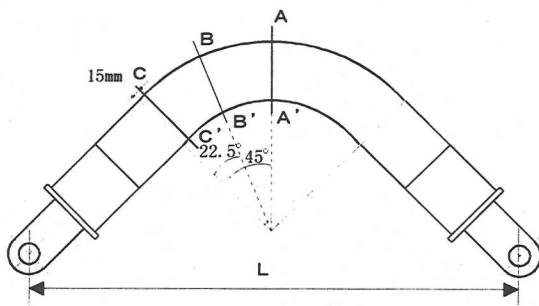


図2 ひずみゲージ貼付断面

(2) 有限要素解析

実験における配管形状、板厚、材料特性、境界条件を忠実にモデル化した3次元シェル要素による有限要素解析（以下、FEM解析とする）を実施し、実験結果と比較した。

解析モデルを図3に示す。モデルは対称性より1/4モデルとした。管厚については、超音波厚さ計にて測定した供試体の実管厚を入力した。材料特性としては、製造の等しい、同材料、同径の曲管から採取したテストピースによる引張試験のデータを基に、応力-ひずみ関係をマルチリニアモデルで近似した。また実験と同様に、両端の回転のみフリーとし、内圧も荷重条件として与えた。解析は、FEM構造解析コードABAQUSを用い、幾何学的非線形をも考慮した大変形解析とした。

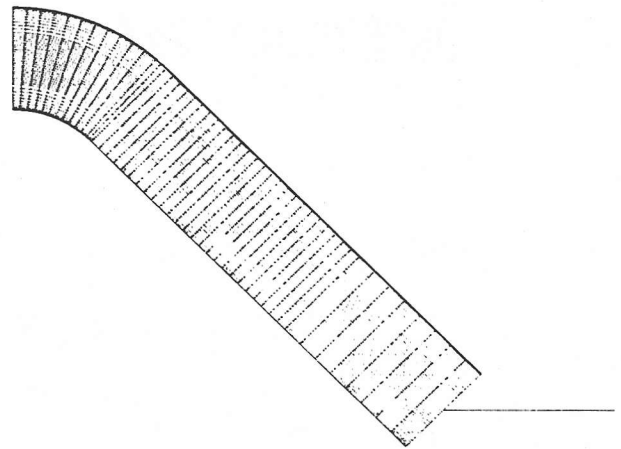
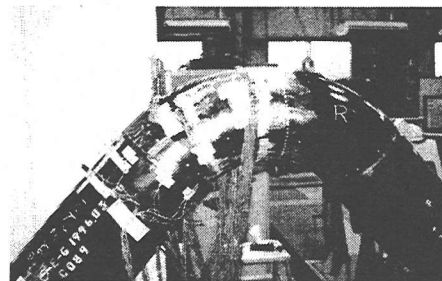


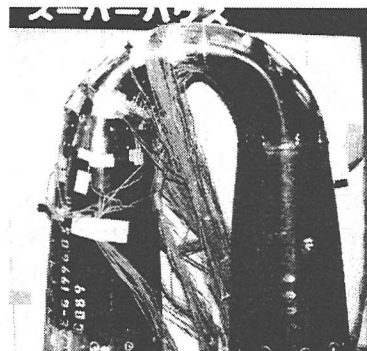
図3 解析モデル(300A)

3. 実験結果及びFEM解析結果の比較

実験及びFEM解析の結果の比較を以下に示す。実験は、供試体の両端が接触するまで行った。一例として、口径300Aで内圧なしの場合について、最大ひずみ3%（曲げ角度7度）、最大ひずみ25%（曲げ角度80度）の時の変形状況及び中央断面形状を図4に示す。



(a) 最大ひずみ3%、曲げ角度7度時



(b) 最大ひずみ25%、曲げ角度80度時

図4 変形状況及び中央断面形状（口径300A、内圧なし）

ここで曲げ角度 θ は、供試管を三角形と近似した場合の幾何学形状から

$$\theta = 90^\circ - 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{L - 0.5 \cdot \delta}{\sqrt{2} \cdot L} \right) \quad (1)$$

により算出した。ただし、ここに示す L は図 2 における初期状態での端部間距離であり、 δ はジャッキによる負荷変位である。

実験により、口径及び内圧の有無にかかわらず、全てのケースについて限界まで曲げても亀裂や漏洩の発生はなく、十分な可とう性を有することが確認できた。

次に実験結果と FEM 解析の比較を行った。口径 300A、内圧なしの結果について、荷重と曲げ角度の関係を図 5 に、最大ひずみと曲げ角度の関係を図 6 に示す。実験と解析の間には、良好な一致が見られ、特にひずみについては 20% を越える領域まで十分再現できることが分かる。また、限界まで曲げた状態での中央断面のひずみ分布について図 7 に示す。断面の扁平により、曲管の脇腹に当たる部分 ($\phi=90$ 度付近) に局所的に卓越した周方向の引張ひずみが発生しているが、FEM 解析はその挙動を忠実に再現している。

他口径、及び内圧ありの場合も同様に、実験と解析の間に良好な一致が見られ、FEM 解析の有効性が確認された。

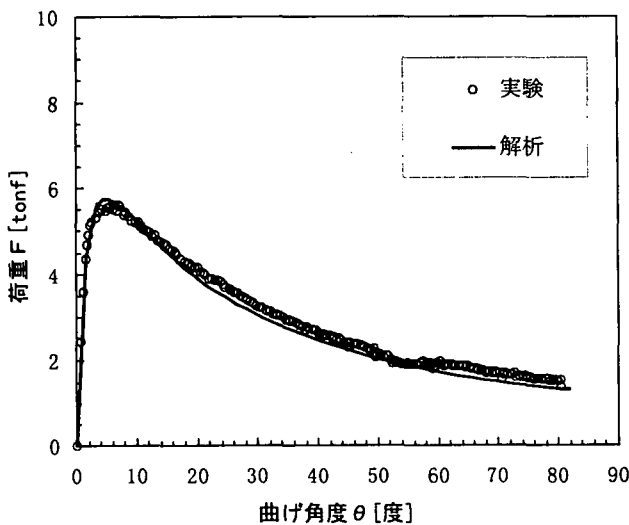


図 5 荷重と曲げ角度の関係

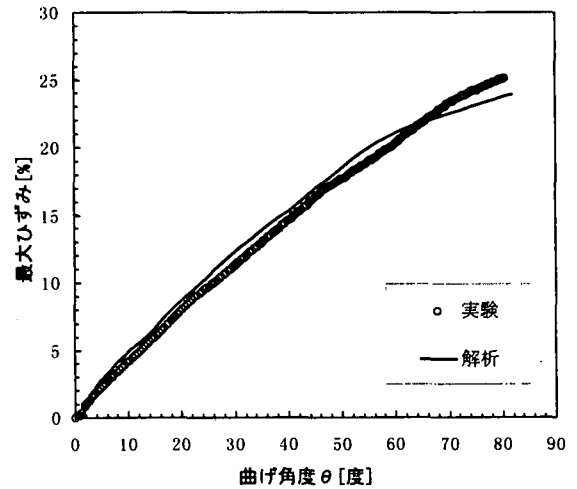
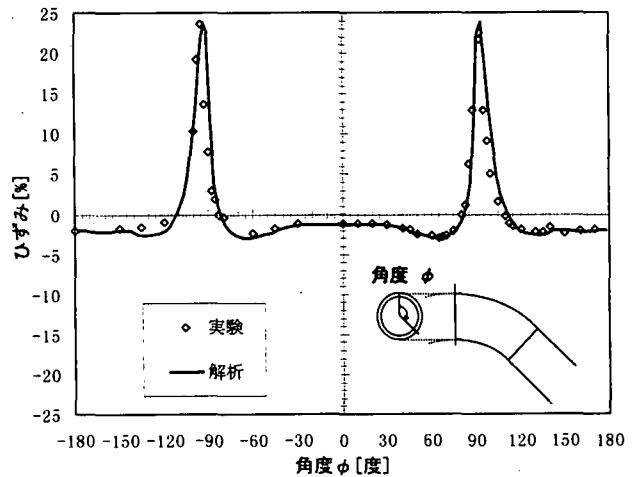
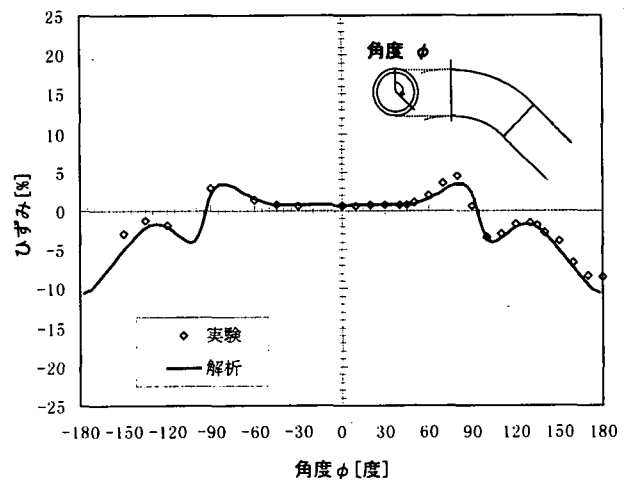


図 6 最大ひずみと曲げ角度の関係



(a) 周方向ひずみ



(b) 軸方向ひずみ

図 7 中央断面のひずみ分布 (300A、曲げ角度 80 度時)

4. 内圧による影響

内圧あり、内圧なしの実験結果について、最大ひずみと曲げ角度の関係を図 8 に示す。若干のばらつきはあるものの、内圧なしの場合、口径に依らず限界まで曲げた状態での最大ひずみは 25% とほぼ一致した。一方、内圧ありの場合も限界状態での最大ひずみは口径に依らず 22% の値をとった。

曲げ角度毎における最大ひずみを、管径管厚比 D/t にて整理した結果を図 9 に示す。ある曲げ角度に対する最大ひずみは、いずれも D/t に依らずほぼ一定値となることが確認された。また、内圧ありと内圧なしを比較すると、曲げ角度が 10 度程度の時点では両者に明確な差異はないが、30 度以上では内圧ありよりも内圧なしの方が高いひずみが発生した。これは、局所的な周方向ひずみの増加に寄与する偏平化に差異が生じたものと考えられる。

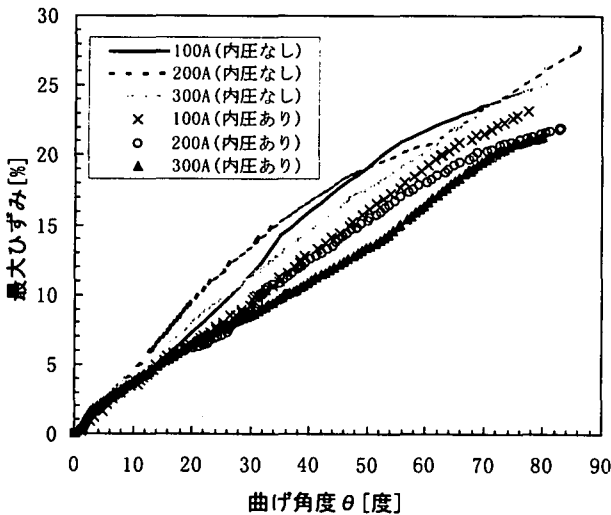


図 8 最大ひずみと曲げ角度の関係 (実験結果)

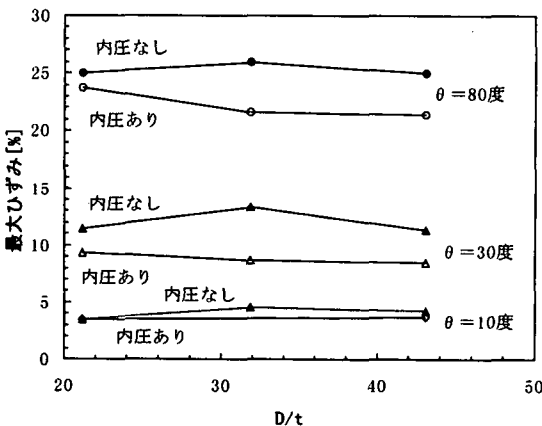


図 9 各曲げ角度での最大ひずみ

5. 結論

曲管の大変形特性について、限界までの面内内曲げ実験を行い、大ひずみ領域までの挙動について定量的な評価を行った。また、内圧ありとなしの実験を行うことにより、曲げ変形挙動に対する内圧の影響を検討した。更にそれらの実験を再現するために、FEM 解析を実施した。その結果から、以下のことが分かった。

- ・内圧の有無にかかわらず、変形状況としては偏平が進行するのみで座屈等の現象は見られず、また極限まで曲げた状態でも亀裂や漏洩の発生はなく、十分な可とう性が確認された。限界まで曲げた状態での最大ひずみは、口径によらず内圧なしでは 25% 程度となり、また内圧ありの場合 22% 程度となった。
- ・内圧がある場合とない場合では、内圧がない方がひずみが大きく、その差は曲げ角度が大きくなるほど顕著となった。
- ・発生ひずみは、管径管厚比 D/t に依らずほぼ同じ値となった。
- ・実験結果を、内圧の有無、口径に依らず、FEM 解析により精度良く再現することができた。これにより、今回行った大きな塑性ひずみ領域までの曲管の挙動に関しても、FEM 解析手法の有効性を確認することができた。

謝辞：曲管実験の計測・データ整理にあたっては菅原氏、細川氏、谷田部氏、及び東京理学検査 (株) の江口氏、萬田氏、佐々木氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小林実央, 安藤広和, 小口憲武: 地震時埋設管に作用する地盤拘束力の速度および繰り返し依存性, 第 23 回地震工学研究発表会, pp. 405-408, 1995
- 2) 安藤広和, 小林実央, 小口憲武: 地震時地盤の側方変位により埋設管に作用する拘束力の検討, 第 23 回地震工学研究発表会, pp. 409-412, 1995
- 3) 原 淳, 竹内辰明, 緒方順一, 鈴木信久, 中野隆, 鈴木勇武: 鋼管の塑性変形能を利用した導管設計, 日本鋼管技法, No. 86, pp. 44-56, 1980
- 4) 鈴木信久, 大場修幸: 埋設パイプライン曲管部の低サイクル疲労強度, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 1355-1364, 1990
- 5) Suzuki, N. and Nasu, M.: Nonlinear Analysis of Welded Elbows Subject to Inplane Bending, Computers & Structures, Vol. 32-No. 3/4, Pergamon Press, pp. 871-881, 1989
- 6) 大内 元, 佐藤紘志: 埋設管路曲管部の大変形挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 32A, pp. 865-878, 1986
- 7) 萩原行人, 瀬戸厚司: 地中配管系の繰り返し大変形下での強度特性, CAMP-ISIJ Vol. 3 pp. 1413, 1990