

大口径ガス導管用鋼製曲管の面内曲げ変形特性

In-plane bending behavior of a large diameter steel elbow for gas pipeline

細川直行*, 谷田部洋*, 渡辺孝仁*

Naoyuki HOSOKAWA, Hiroshi YATABE, Takahito WATANABE

* 東京ガス(株) 研究開発部基礎技術研究所(〒105-0023 東京都港区芝浦 1-16-25)

In-plane bending experiments and finite element analysis were conducted in the closing and opening direction for large diameter(600mm) elbow. As well as the small diameter(100, 200, 300mm) elbows, the leakage was not generated, even if it was bent to 76 degrees in the closing direction. In the opening direction, the deformation was localized near the tube top of the elbow, and the crack was generated, when it was bent to -28 degrees. That the finite element analysis was applicable to the bending to 76 degrees in the closing direction and to the bending by peak moment right before in the opening direction clarified.

Key Words: pipeline, elbow, large deformation, finite element analysis

キーワード: パイプライン, 曲管, 大変形, 有限要素解析

1. 緒言

溶接接合鋼管である埋設パイプラインに地盤沈下や地震動により, 地盤変位が作用した場合, 直管に比べ可とう性に富む曲管に変形が集中する。曲管の変形特性については弾性域~数%のひずみレベルまでは詳しく検討されており^{1), 2)}, 通常考えられる数10cm程度の地盤変位量では, 曲管が破壊に至ることはないよう設計³⁾, 管理が行われている。

ただし, 近年注目されるようになった液状化による側方流動や地滑りのように, 短時間に一定方向に数mに及ぶ地盤変位が作用する場合もある。このような場合でも材料の延性, 配管の可とう性により, 相当の変位吸収能力があると予測される。しかしながら, 曲管の前後で地盤から作用する力が大きく変化する^{4), 5), 6)}ため, 曲管の変形が許容量を超えることも考えられる。したがって, 曲管を有するパイプラインの数mに及ぶ地盤変位に対する性能を評価するためには, 曲管の限界までの変形特性を定量的に把握しておく必要がある。しかしながら, 曲管の塑性域, 特に最大モーメント点以降の変形特性については, 研究途上であり, ひずみの測定レベルも数%程度にとどまっていた。

こうした背景のもと, 著者らは既報⁷⁾にて小口径(口径100, 200 および 300mm)の中圧ガス導管に一般に用いられる曲管(中心角90度, 曲率半径は管外径の1.5倍)に対して, 面内曲げ実験および有限要素解析を実施(内圧0.1および1MPa)し, 数10%のひずみレベルまでの性能把握を試みた。それによれば, 同曲管はひずみ20%程度におい

てもき裂・漏洩の発生が無いこと, またそのレベルまで有限要素解析が適用可能であることが明らかになった。また, この小口径実験によれば, 内曲げ(曲管が閉じる変形)では管径管厚比(D/t), 内圧の大きさによらず, 曲管中央断面が偏平化したが, 外曲げ(曲管が開いて, 直管に近づく変形)では管径管厚比, 内圧の大きさに依存して変形状況が異なることが明らかとなった。すなわち, 口径100 および 200mm($D/t=21, 32$)では内圧の大きさに依存せず変形の進行とともに曲管断面が長円化するため, ある時点を境に変形が曲管から直管に移行するのに対して, 口径300mm($D/t=43$)では内圧1MPa作用時にはこれらと同様な変形が生じるものの, 内圧0.1MPa作用時には曲管中央断面でへこみが生じる結果となった。これらの変形状況の相違は, 管径管厚比や内圧の大きさに依存する曲管と直管の曲げ剛性の差に起因していると考えられるが, 詳細は明らかでない。

本報では, 既報で検討した口径100~300mmの曲管に比べて, 管径管厚比が大きい口径600mmの中圧ガス導管に一般に用いられる鋼製曲管を用いて, 面内曲げ実験および有限要素解析を行い, 限界までの変形特性の定量的把握を試み, 小口径実験結果とあわせて比較検討することによって, 前述した外曲げでの変形状況の相違について考察したので以下に報告する。

2. 面内曲げ実験

2.1 実験条件

曲管は JIS G2311 に規定される, 口径 600mm, 中心角

表-1 供試体の諸元

		内曲げ	外曲げ
外径 (mm)	規格値 D	609.6	
	実測値 D'	611.2	611.9
管厚 (mm)	規格値 t	9.5	
	実測値 t'	9.5	9.5
管径管厚比	D/t	64	64

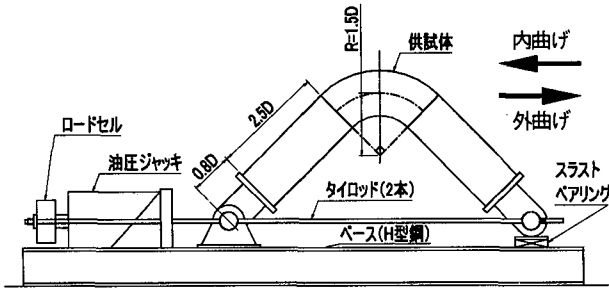


図-1 実験装置

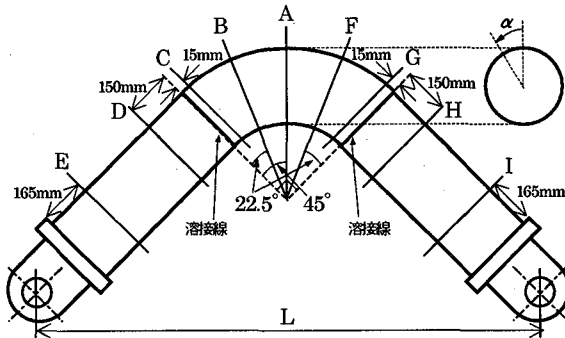


図-2 ひずみゲージ貼付断面

90度、曲率半径は管外径の1.5倍のロングエルボとした。材質はSTPY400(JIS G3457/引張強さ400MPa以上、降伏点225MPa以上)である。

実験装置および内曲げ、外曲げの定義を図-1に示す。供試体は、曲管の両側に長さ2.5D(管外径の2.5倍に相当)の直管(材質STPY400)を溶接により接合し、曲管の偏平が拘束されないように配慮した。さらに供試体が面内の回転のみとなるよう、両端に治具を接合し固定した上で、タイロッドを介して油圧ジャッキにて変位を付加した。また、実験装置は供試体に比べ、十分高い剛性を有するよう配慮した。

兵庫県南部地震においては地滑りの速度が数m/secに達したとの報告がある⁸⁾が、この程度の変形速度であれば鋼材の応力およびひずみに与える影響は小さいことが確認されている^{9), 10)}。したがって、载荷速度は準静的に約0.1mm/secとした。内曲げについては供試体両端の治具が接触するまで、外曲げについては油圧ジャッキの载荷荷重の能力限界である2300kNまで変位を付加し、き裂・漏洩の発生を確認することを目標とした。内圧は中圧ガス導管を想定して、最高使用圧力である1MPaを水压にて付加した。

载荷荷重、ジャッキ変位、内圧および供試体のひずみを、それぞれロードセル、変位計、圧力計およびひずみゲージにて測定した。供試体は防食用の樹脂性被覆で覆われているため、ひずみゲージは図-2に示す断面において被覆を除去した後、鋼表面に貼付した。小口径実験の結果から、変形が集中すると予測された箇所を中心に、

管周方向および管軸方向に貼付した。最小の間隔は管周方向に2.5度とし、内曲げについてはA~EおよびI断面の計174箇所、外曲げについてはA~I断面の計343箇所に貼付した。ひずみゲージは主にゲージサイズ5×1.5mm(ベースサイズ10×3mm)の一軸塑性ゲージを使用した。使用したひずみゲージの測定限界が10%程度であるため、限界値に達した場合には適宜貼り替えることにより、変形限界までのひずみ測定を試みた。

実験は内曲げ、外曲げについてそれぞれ1体ずつ実施した。供試体の諸元を表-1に示す。外径は管周方向に45度毎に、管厚は同じく10度毎に、それぞれひずみゲージ貼付断面にて測定し、その平均値を実測値として示している。内曲げ、外曲げ用供試体とも断面形状は、曲管中央のA断面では横($\alpha=90-270$ 度方向)に長い楕円状であり、直管との溶接線に近づくにつれ、円形に近づいてゆく。管厚については、規格値に対して+12%~6%の範囲でばらついてはいたが、分布に規則性は見られず、平均値はほぼ規格値通りであった。このような外径、管厚の分布となったのは、曲管が熱間マンドレル押し曲げで加工されていることが理由と考えられる。

また、供試体はUOE方式で製管されているため、管軸方向に溶接線を1つ有するが、管軸方向溶接線は曲管では $\alpha=45$ 度の位置、直管では $\alpha=135$ 度の位置となるようにした。

2.2 実験結果および考察

内曲げ、外曲げの実験より得られた曲げモーメントM、最大ひずみ $\epsilon_{\max}$ と曲げ角度 θ の関係を図-3に示す。供試体を三角形と近似した場合の幾何形状から、M、 θ はそれぞれ式(1)、(2)より算出した。

$$M = F \cdot \sqrt{\frac{L^2}{2} - \left(\frac{L-\delta}{2}\right)^2} \quad (1)$$

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

ここで、F、Lおよび δ はそれぞれ载荷荷重、図-2における初期状態での端部間距離および油圧ジャッキ変位である。Fおよび δ は図-2左向きを正とする。なお、最大ひずみとは、管周方向もしくは管軸方向測定ひずみの

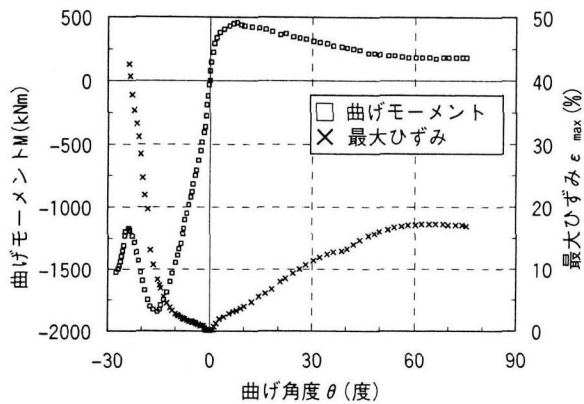


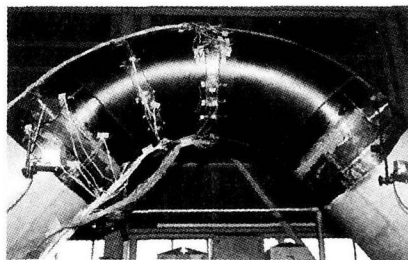
図-3 実験結果(曲げモーメント, 最大ひずみと曲げ角度, θ : +内曲げ, -外曲げ)

絶対値の最大値である。曲管と直管での値を比較したが、内曲げ、外曲げとも曲管において常に最大となっていた。

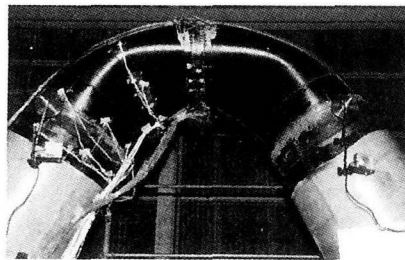
内曲げ実験においては、 $\theta=8$ 度で曲げモーメントは最大となった。最大モーメント点までは図-4(a)に示すように既報⁷⁾で示した小口径実験(以下、小口径実験と呼ぶ)と同じく、曲管のB~A~F断面にかけて断面形状が横($\alpha=90\sim270$ 度方向)に長くなる扁平化が進んでおり、ひずみはA断面の $\alpha=90\sim95$ および $265\sim270$ 度での管周方向引張りひずみが最大となった。最大モーメント点以降は、小口径実験とはやや異なる変形となった。小口径実験では管径管厚比($D/t=21\sim43$)や内圧の大きさにかかわらず、曲管中央断面での扁平化が進んでゆく変形となった。それに対し、口径600mm($D/t=64$)では図-4(b)に示すように曲管中央のA断面での扁平化も進んでゆくが、それ以上にBおよびF断面からややA断面よりの断面に変形が集中し、ここで折れ曲がりが進んでゆく変形となった。

その後、この折れ曲がり progresses 進まなくなると、A断面からわずかにF断面よりの断面の $\alpha=180$ 度付近で、管軸方向に管表面に対して凹型の板曲げ状の変形が卓越した。最終的には図-4(c)に示す $\theta=76$ 度で両端の治具が接触した。最大モーメント点以降、ひずみはB断面の $\alpha=90\sim95$ および $265\sim270$ 度での管周方向引張りひずみが最大となった。測定された最大ひずみは $\theta=76$ 度においてB断面の $\alpha=90$ 度での管周方向引張りひずみ17%であった。しかしながら、最大モーメント点以降、変形の集中が確認された箇所にはひずみゲージが貼付されておらず、最大モーメント点以降の最大ひずみの測定値は必ずしも発生ひずみの最大値では無い可能性がある。これについては後述の有限要素解析において確認する。小口径実験と同様に、治具が接触するまで曲げても、き裂・漏洩の発生はなかった。さらに治具が接触した状態で内圧を2MPaに昇圧し5分間保持し、気密性を確認した。

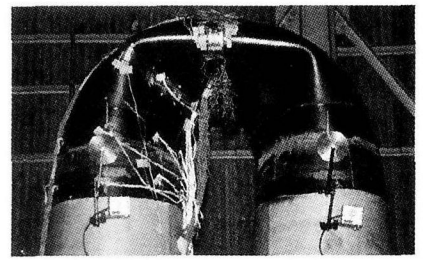
外曲げ実験においては、図-5(a)に示す $\theta=-15$ 度で曲げモーメントは最大となった。最大モーメント点直前までは、曲管の断面形状が縦($\alpha=0\sim180$ 度方向)に長くなる扁平化が進んでおり、その時のひずみはA断面の $\alpha=120\sim135$ および $225\sim240$ 度での管軸方向引張りひずみ、 $\alpha=60$ および 300 度での管軸方向圧縮ひずみがほぼ同程度で最大となった。最大モーメント点直前からA断面近傍の管頂付近($\alpha=0\sim30$ および $330\sim360$ 度)でへこみが生じはじめ、最大モーメント点以降はこのへこみでの変形が急速に進展し、塑性による局部的な皺が発生し、変形も対称ではなくなった。 $\theta=-24$ 度時点で、皺同士が接触したため、載荷荷重が再び増加し、曲げモーメントも増加に転じた。最終的には図-5(b)に示す $\theta=-28$ 度において、もともとはA断面の $\alpha=0$ 度近傍でき裂・漏洩が発生した。



(a) 最大モーメント点($\theta=8$ 度)

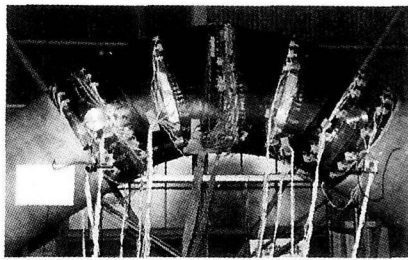


(b) 最大ひずみ10%($\theta=26$ 度)

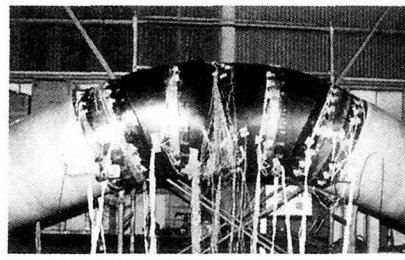


(c) 治具接触状態($\theta=76$ 度)

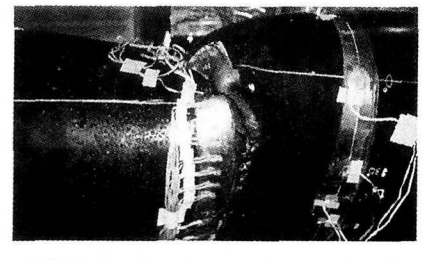
図-4 実験結果(内曲げの変形状況)



(a) 最大モーメント点($\theta=-15$ 度)

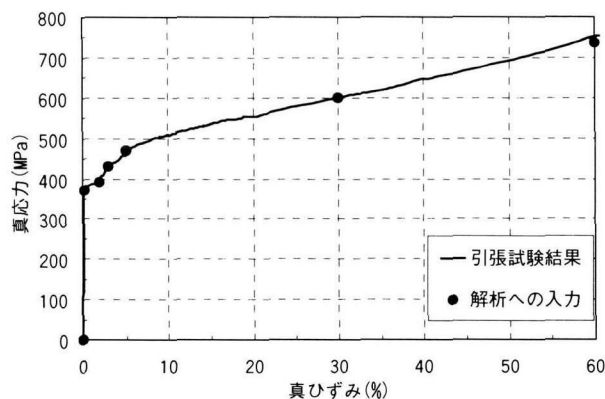


(b) 限界状態($\theta=-28$ 度)

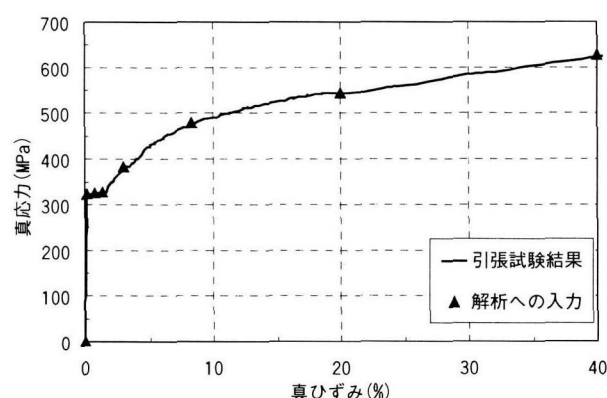


(c) 漏洩発生箇所($\alpha=0$ 度方向から撮影)

図-5 実験結果(外曲げの変形状況)



(a) 曲管



(b) 直管

図-6 供試体の応力—ひずみ関係

口径 100 および 200mm($D/t=21, 32$)の小口径実験では最終的には、曲管と直管の溶接線近傍の直管において、 $\alpha=180$ 度の位置で周方向き裂が発生し漏洩に至っている。これは同部の管軸方向の延性破壊であるとされている。口径 600mm($D/t=64$)では図-5(c)に示すように A 断面近傍の $\alpha=0$ 度付近に発生した皺部の管内側に入り込んだ部分で、き裂・漏洩が発生しており、これらとは破壊形態が異なっている。変形状況は、A 断面近傍の管頂付近でへこみが生じるという点において、口径 300mm($D/t=43$)の内圧 0.1MPa 作用時の結果と類似していたが、同実験では載荷荷重が不足し、き裂・漏洩の発生を確認していないため、最終的な破壊形態の比較は出来なかった。最大モーメント点以降、ひずみは A 断面の $\alpha=0\sim 15$ 度での管周方向引張ひずみが最大となった。しかしながら、 $\theta=-20$ 度程度より漏洩発生部にくびれ状に変形が集中し、ひずみゲージの貼り替えが困難となったため、測定された最大ひずみは $\theta=-24$ 度において A 断面の $\alpha=5$ 度での管周方向引張ひずみ 42%であった。漏洩発生時にはさらに大きなひずみが発生していたと考えられる。

3. 有限要素解析

3.1 解析条件

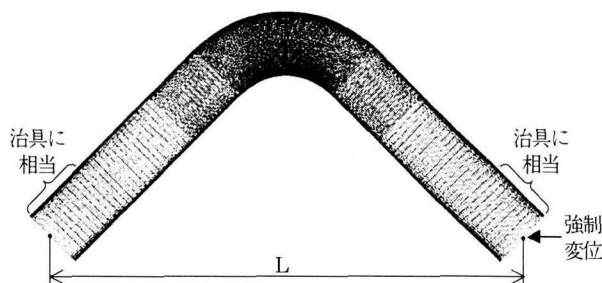


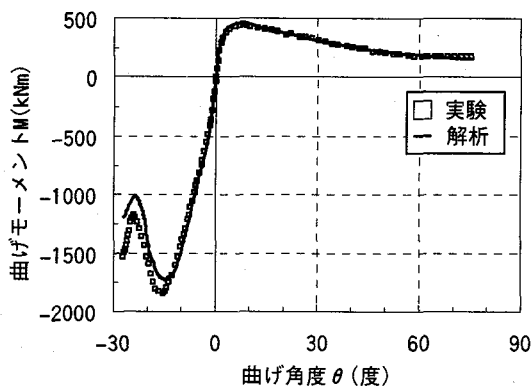
図-7 解析モデル

実験条件をモデル化した有限要素解析を実施し、実験結果と比較した。実験において、数 10%のひずみが確認されているため、幾何学的非線形、有限ひずみの影響を考慮した弾塑性大変形解析とした。解析コードには ABAQUS ver.5.8を使用した。

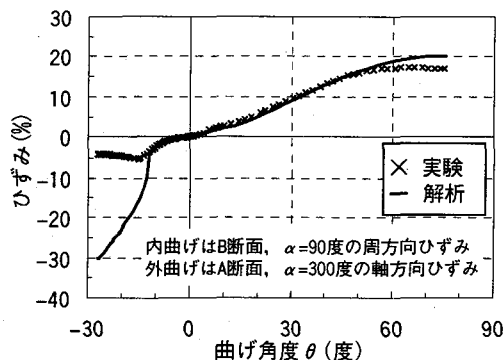
材料特性については、実験に使用した供試体と製造と同じくする、同規格、同寸法の曲管、直管から採取した丸棒試験片に対し、レーザー光を利用した断面積測定装置を用いて引張試験を行い、真応力—真ひずみ関係を得た。解析には、真応力—真ひずみ関係をマルチニア近似して入力した。曲管から採取した試験片の引張試験結果および曲管の応力—ひずみ関係として解析に入力した点を図-6(a)に、直管から採取した試験片の引張試験結果および直管の応力—ひずみ関係として解析に入力した点を図-6(b)に示す。曲管については $\alpha=180$ 度付近から採取した試験片の結果を示している。実際の供試体、特に曲管は製管の過程で複雑な塑性履歴を受けており、材料特性も様々ではないと考えられる。しかしながら、材料特性の詳細な分布を調べて、これを解析に入力することは現実的ではないため、解析においては曲管、直管のそれぞれに均一な材料特性を与えた。塑性モデルには、一般的な金属の塑性モデルである連合流れ則を用いた Mises の降伏曲面および等方硬化則を使用した。外曲げの実験結果から、A 断面近傍の皺発生部は引張、圧縮が繰り返される複雑な挙動を示したと考えられ、本来なら移動硬化則等を用いた解析が望ましい。しかしながら、そうしたより詳細な解析に必要な材料特性を得ることは容易でないため、本報では等方硬化則を使用した。

形状については、外径の実測値を基に断面形状を $\alpha=90\sim 270$ 度方向を長軸、 $\alpha=0\sim 180$ 度方向を短軸とする楕円形と近似した。また、管厚については、分布に規則性が無いため、実測値の平均値を使用した。両端の治具は、剛性が高く、実際には変形の発生しない部分である。ここでは簡単のため、治具に相当する部分を供試体の直管と等しい外径、管厚を有するものとし、その弾性係数を供試体の 1000 倍とすることで、治具の剛性をモデル化することとした。溶接部についてのモデル化は行わなかった。

要素には、せん断変形が考慮された 4 節点低減積分シェル要素を使用した。要素分割は管周方向には 2.5 度お



(a) 曲げモーメントと曲げ角度



(b) ひずみゲージ貼付位置でのひずみと曲げ角度

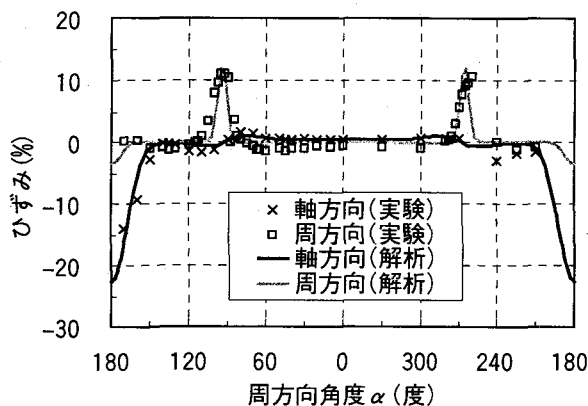
図-8 実験結果と解析結果の比較 (θ : +内曲げ, -外曲げ)

きに、管軸方向には曲管と曲管近傍の直管は要素の縦横比が、ほぼ1:1になるように、それ以外の直管は縦横比が1:5になるように分割した。解析モデルを図-7に示す。

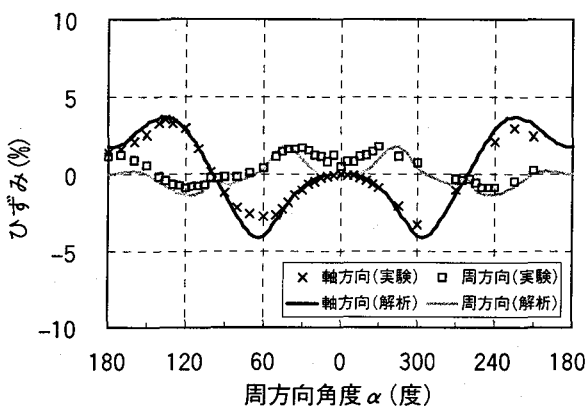
実験と同様に内圧 1MPa を荷重条件として与えた後、油圧ジャッキ変位 δ に相当する強制変位を境界条件として与えた。実験と同様に、両端の面内の回転はフリーとなっている。内曲げにおいては治具が接触した δ まで、外曲げにおいてはき裂・漏洩が発生した限界状態の δ まで、ABAQUS の自動増分機能を用いて計算を行い、各増分での反力、ひずみを算出した。

3.2 実験結果との比較および考察

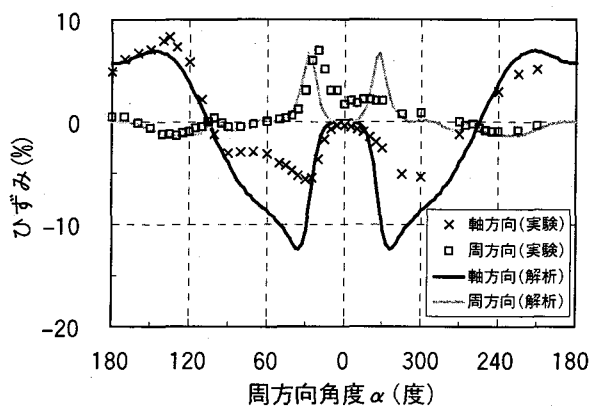
内曲げ、外曲げの解析より得られた曲げモーメント M と曲げ角度 θ の関係を図-8(a)に、ひずみゲージ貼付位置でのひずみと曲げ角度 θ の関係の一例を図-8(b)に示す。なお、図中には比較として実験結果もあわせて示している。内曲げでは実験において $\theta = 40$ 度から治具接触状態 ($\theta = 76$ 度) までの最大ひずみ測定箇所である B 断面の $\alpha = 90$ 度での管周方向ひずみ、外曲げでは最大モーメント点 ($\theta = -15$ 度) までのひずみ分布等について議論するため、実験において最大モーメント点直前の $\theta = -12$ 度



(a) 内曲げ 治具接触状態 ($\theta = 76$ 度)



(b) 外曲げ ($\theta = -12$ 度)

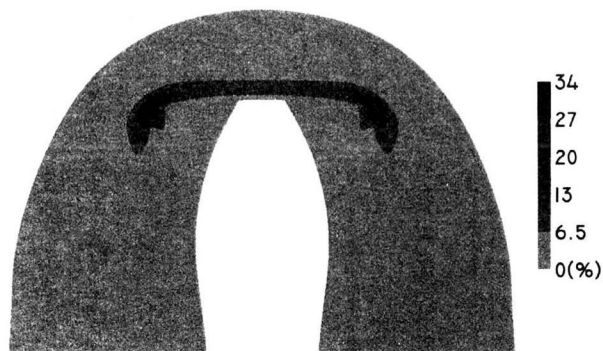


(c) 外曲げ 最大モーメント点 ($\theta = -15$ 度)

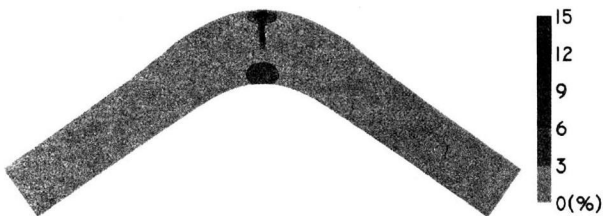
図-9 A 断面のひずみ分布

でひずみが卓越した A 断面の $\alpha = 300$ 度での管軸方向ひずみの結果を示した。

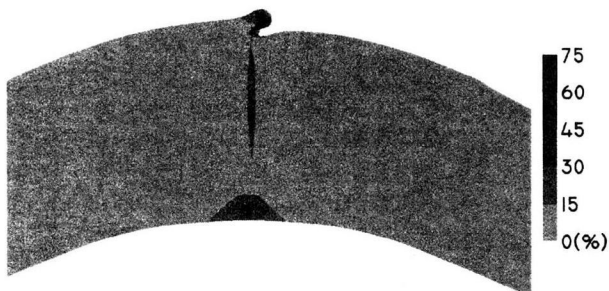
内曲げの解析結果は、図-8(a)に示す曲げモーメントについては、実験開始から治具接触に至るまで実験結果と良く一致している。図-8(b)に示す実験において最大ひずみが測定された位置でのひずみについては、 $\theta = 50$ 度、ひずみ 15%程度までは実験とはほぼ等しい値となっている。 $\theta = 50$ 度以降実験結果との差が若干大きくなっている。これは $\theta = 50$ 度以降も変形が進んでいるにもかかわらず、測定値が急に一定となっていることから、ひずみゲージが測定限界を越えたことや、それに伴う貼り替



(a)内曲げ 治具接触状態 ($\theta=76$ 度)



(b)外曲げ 最大モーメント点 ($\theta=-15$ 度)



(c)外曲げ 限界状態 ($\theta=-28$ 度)

図-10 解析結果(変形状況およびひずみ分布)

え作業などに起因した測定誤差によるものと考えられる。治具接触状態におけるA断面のひずみ分布の実験と解析の比較結果を図-9(a)に示す。解析結果は、ひずみゲージ貼付位置で測定された値と良く一致しており、十分妥当であることがわかる。同じく治具接触状態における変形状況とひずみ分布の解析結果を図-10(a)に示す。図-10に示すひずみの解析結果は管表面におけるMisesの相当ひずみである。図-10(a)は図-4(c)に示す実験での変形状況と良く一致している。図-9(a)、10(a)では治具接触状態での結果のみ示したが、実験開始から治具接触に至るまで、ひずみ分布、変形状況は良好な一致を示していた。したがって、内曲げについては本報で示した解析手法を用いることで、曲げモーメント、ひずみ分布、変形状況を実験開始から治具接触状態に至るまで、実用上十分な精度で算定し得ることが明らかになった。ただし、実験における最大ひずみの正確な測定が15%程度にとどまったため、これ以上のひずみレベルでの解析精度の検証は実施出来なかった。

外曲げの解析結果は、図-8(a)に示す曲げモーメント

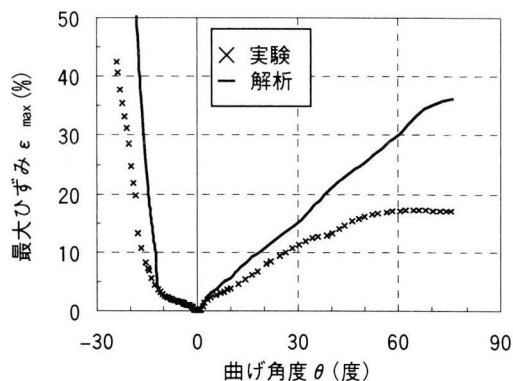


図-11 最大ひずみと曲げ角度(θ : +内曲げ, -外曲げ)

については、実験での最大モーメント点直前の $\theta=-12$ 度程度まで実験結果と良く一致している。図-8(b)に示すひずみゲージ貼付位置でのひずみについても、最大モーメント点直前の $\theta=-12$ 度まで実験結果と良く一致している。最大モーメント点直前の $\theta=-12$ 度におけるA断面のひずみ分布の実験と解析の比較結果を図-9(b)に示す。実験結果はほぼ対称なひずみ分布となっており、解析結果も実験結果と良く一致している。最大モーメント点におけるA断面のひずみ分布の実験と解析の比較結果を図-9(c)に、変形状況とひずみ分布の解析結果を図-10(b)に示す。解析はA断面近傍でのへこみの発生を再現しており、図-10(b)は図-5(a)に示す実験での変形状況と一致している。しかしながら、図-9(c)に示すように実験におけるひずみの測定結果は、特に管頂付近($\alpha=0\sim30$ および $330\sim360$ 度)で曲管断面の左右で非対称となっており、断面形状を楕円形と近似した解析では、ひずみ分布までは正確に再現出来なかった。解析においても最大モーメント点以降、へこみ部で変形が局所化し、A断面近傍の $\alpha=0$ 度付近で皺が発生したが、図-10(c)に示すように最終的な変形状況は実験とは若干異なっていた。このように特に最大モーメント点以降、実験結果と解析結果に差が生じているのは、実験において非対称な変形が発生し始め、それが本解析では考慮しなかった外径、管厚の細かな分布、製管時および実験中の複雑な塑性履歴、溶接部の存在に影響されていたためと推察される。したがって、外曲げについては本報で示した解析手法を用いることで、曲げモーメント、ひずみ分布については最大モーメント点直前の $\theta=-12$ 度程度まで、変形状況については実験の初期段階における断面形状が縦($\alpha=0\sim180$ 度方向)に長くなる扁平化から、A断面での変形の集中、へこみの発生までを再現し得ることが明らかになった。

3.3 内曲げにおける最大ひずみの推定

有限要素解析は内曲げについては、実験における最大

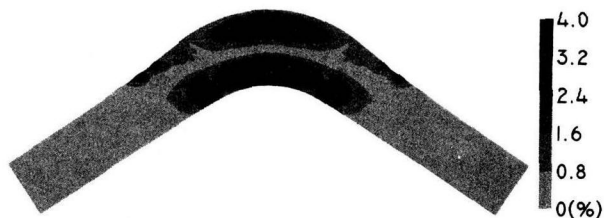


図-12 初期断面形状の影響の解析結果(外曲げ, $\theta = -16$ 度, 内圧 1MPa)

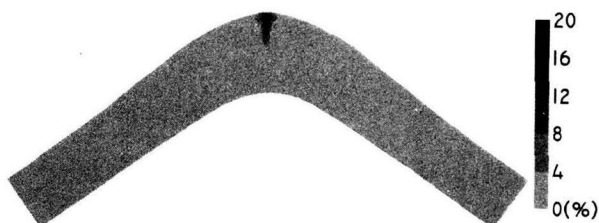
ひずみの測定結果を $\theta = 50$ 度, ひずみ 15% 程度までは精度良く算定していることが分かったため, 解析によりひずみゲージを貼付していない部分を含めた曲管あるいは直管に発生する最大ひずみの推定を試みた. 最大ひずみ ϵ_{max} と曲げ角度 θ の関係の推定結果を図-11 に示す. なお, 図中には比較として図-3 の実験結果および参考として外曲げの結果もあわせて示している. ひずみの解析結果は, 各要素の積分点での管周方向もしくは管軸方向ひずみの絶対値の最大値を示している.

解析によるひずみは実験結果と同様, 曲管において常に最大となっており, 最大ひずみは治具が接触した時点 ($\theta = 76$ 度) で 36% であった. 解析で最大ひずみが発生した箇所および方向は, $\theta = 9$ 度までは A 断面の $\alpha = 95$ および 265 度での管周方向ひずみ, $\theta = 9 \sim 28$ 度までは B および F 断面から 2.5 度程度 A 断面よりの断面の $\alpha = 95$ および 265 度での管周方向ひずみ, $\theta = 28 \sim 50$ 度までは A 断面の $\alpha = 180$ 度での管軸方向ひずみ, $\theta = 50 \sim 76$ 度までは再び B および F 断面から 2.5 度程度 A 断面よりの断面の $\alpha = 95$ および 265 度での管周方向ひずみであった. 解析においてひずみが最大となる場所は, 実験の各段階で目視によって変形の集中が確認された箇所とほぼ一致している.

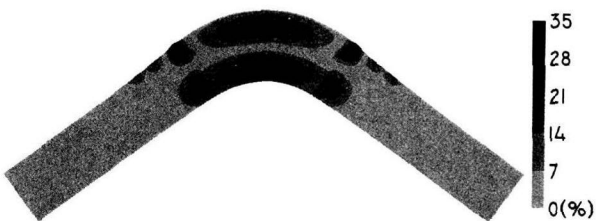
解析により $\theta = 9 \sim 28$ 度, $50 \sim 76$ 度においてひずみが最大となった B および F 断面から 2.5 度 A 断面よりの断面にはひずみゲージが貼付されておらず, そのため最大ひずみの実験結果と解析結果に差異が生じていると考えられる. $\theta = 28 \sim 50$ 度においては, 実験では B 断面の $\alpha = 90 \sim 95$ および $265 \sim 270$ 度の, 解析では A 断面の $\alpha = 180$ 度のひずみが最大となっている. 実験では A 断面の $\alpha = 180$ 度の位置にもひずみゲージは貼付されていたが, 2.2 で述べた通り, 同部での板曲げ状の変形が発生した箇所は A 断面からわずかにずれていたため, 変形が集中した箇所のひずみが測定されておらず, このような差異が生じたものと考えられる.

3.4 外曲げの変形状況に及ぼす初期断面形状および内圧の影響

これまでの結果から外曲げの変形状況としては, 口径 100 や 200mm ($D/t = 21, 32$) に代表される曲管と直管の溶接線近傍の直管で変形する場合, また今回実験で示した口径 600mm ($D/t = 64$) に代表される曲管中央断面で変形する



(a) 内圧 0.1MPa ($\theta = -14$ 度)



(b) 内圧 2MPa ($\theta = -13$ 度)

図-13 内圧の影響の解析結果(外曲げ)

場合の 2 通りが考えられた. これらの変形状況に及ぼす管径管厚比 (D/t) の影響は, 内圧 1MPa 作用時の結果によれば, $D/t = 21 \sim 43$ では前者, $D/t = 64$ では後者となる. つまり, 管径管厚比に依存する曲管の曲げ剛性が大きいと, 変形初期に曲管で変形した後は曲管断面の長円化により, 曲げ剛性がさらに上昇するため, 直管の曲げ座屈に移行する結果を示している. この曲管の曲げ剛性に及ぼす要因としては, 管径管厚比以外にも断面形状や内圧も考えられるため, 有限要素解析によりこれらの影響を調べた.

曲管の初期断面形状のみ, 表-1 に示した規格値の円形とした場合の変形状況とひずみ分布の解析結果を図-12 に示す. 断面形状以外の条件は 3.1 の通りである. 図-10(b) の結果とは異なり, 曲管のみならず直管にも変形が集中する傾向がみられた. これは変形状況が曲管の初期断面形状に依存すること, 言い換えれば実験での変形状況を解析で再現するためには曲管の初期断面形状を考慮する必要があることを示している.

次に内圧のみを 0.1MPa および 2MPa とした条件での変形状況とひずみ分布の解析結果を図-13 に示す. 内圧以外の条件は 3.1 の通りである. 内圧 0.1MPa では図-10(b) の結果と同様に曲管中央断面でへこみが生じたが, 内圧 2MPa では直管に変形が集中した. これらのことから, 外曲げの変形状況を支配する要因としては管径管厚比のみならず, 曲管の断面形状や内圧が考えられることが分かった.

4. 結言

大口径ガス導管用鋼製曲管である口径 600mm ($D/t = 64$), 中心角 90 度のロングエルボに対し, 内圧 1MPa を付加して面内曲げ実験および有限要素解析を実施した. その結果を口径 100, 200 および 300mm ($D/t = 21, 32$ および 43)

の小口径実験と比較した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 内曲げ実験では最大モーメント点以降、曲管中央と直管との溶接線の間付近で変形が集中し、小口径実験とはやや異なる変形状況となったが、小口径実験と同様、治具が接触(曲げ角度 $\theta=76$ 度)するまで曲げてもき裂・漏洩の発生は無かった。また、内曲げ解析では治具が接触するまで、曲げモーメント、ひずみ分布および変形状況が実験と良く一致した。
- (2) 外曲げ実験では最大モーメント点以降、曲管中央断面近傍の管頂付近($\alpha=0\sim30$ および $330\sim360$ 度)でへこみが発生し、 $\theta=-28$ 度において曲管中央断面近傍の管頂($\alpha=0$ 度)でき裂・漏洩が発生した。その際に実測した最大ひずみは42%であった。この変形状況は内曲げ実験と同様に小口径実験とは異なった。また、外曲げ解析では最大モーメント点直前まで、曲げモーメント、ひずみ分布および変形状況が実験と一致した。最大モーメント点以降は実験では非対称な変形が生じたが、これを解析で再現することは出来なかった。
- (3) 小口径～大口径の曲管(中心角90度)の外曲げ変形状況として、曲管と直管の溶接線近傍の直管に変形が集中する場合、曲管中央断面でへこみが生じて、そこに変形が集中する場合の2通りが考えられた。その変形状況の違いは、管径管厚比(D/t)、曲管の初期断面形状および内圧に依存することが有限要素解析で検証された。

謝辞：実験の実施には(株)コベルコ科研、解析の実施には(株)日本オープンシステムズ毛塚貴美子氏の多大なる協力を頂いた。東京ガス(株)の安藤広和氏、吉崎浩司氏には貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) ASME : ASME SECTION III DIVISION I — Subsection NB—3653.2, SI—13.
- 2) 例えば、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、日本鋼管技報 No.86, pp.44-56, 1980.
- 3) 日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針, 1982.
- 4) 小林実央、安藤広和、小口憲武：埋設管に作用する軸方向地震時地盤拘束力に及ぼす地盤の速度と繰り返し変位の影響、土木学会論文集 No.591/I-43, pp.299-312, 1998.4.
- 5) 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.
- 6) Trautmann, C.H. and O'Rourke, T.D. : Lateral Force-Displacement Response of Buried Pipe, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol.111 No.9, pp.1077-1092, 1985.
- 7) 吉崎浩司、細川直行、安藤広和、小口憲武、曾我部潔、濱田政則：地盤の大変位に対する曲管配管の変形特性、土木学会論文集 No.626/I-48, pp.173-184, 1999.7.
- 8) 佐々恭二：西宮市仁川で発生した地震時高速地すべり、土と基礎 44-2, pp.83-85, 1996.
- 9) 吉崎浩司、小口憲武：ガスパイプライン鋼材の引張特性に及ぼすひずみ速度の影響、第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3171-3174, 1998.
- 10) 石川信行、小林泰男、東田幸四郎、前中浩、牛嶋通雄、高田篤志、豊田政男：各種構造用鋼の引張特性および延性脆性遷移挙動に及ぼす歪速度の影響(動的荷重下における構造用鋼の変形特性-2), CAMP-ISIJ Vol.9, pp.1176-1179, 1996.

(1999年9月17日受付)