

小口径ガス導管用鋼製直管の曲げ変形特性

Bending deformation behavior of a small diameter gas pipeline

谷田部 洋*, 渡辺 孝仁*

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 this study, bending experiments of straight pipes were carried out in order to evaluate the large deformation behavior of pipeline. As the pipes for experiments, pipes with girth weld and pipes without girth weld were employed. The grade of pipes was JIS SGP of 114.3mm outer diameter. These pipes were given internal pressure (<1MPa) during experiment. In order to evaluate the behavior after the peak of bending moment, that is generation of buckling, pipe specimens were deformed until bending angle over 130 degrees. As the result, in pipes without girth weld, leakage was not generated. Similarly, leakage was not generated in the pipes with girth weld because local buckling was not generated in girth weld zone. Finite element analyses (FEA) were also carried out to represent the deformation behavior of straight pipes and it is confirmed that FEA was applicable to the deformation to bending angle 50 degrees.

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

キーワード: パイプライン, 大変形, 座屈, 有限要素解析

1. 緒 言

埋設パイプラインは地震時に周囲の地盤変動に伴い変形を受ける可能性があるため、その変形特性を評価するための研究が行われてきた¹⁾²⁾。その結果、レベル1やレベル2のような異なる大きさの地震動に対する設計指針が確立され、ガス導管耐震設計指針³⁾⁴⁾や石油パイプライン技術基準⁵⁾などに反映されている。従って、これらの規定に基づくパイプラインでは、数100mm程度の変位を起こす地震動に対しては、変形が許容範囲に収まるように設計、管理が行われている。

一方、近年では液状化による側方流動や地滑りのような数mに及ぶ地盤変状に対する埋設パイプラインの塑性変形に至る変形特性を評価する研究が行われている^{6)~8)}。特に、溶接接合鋼管では直管に比べて可とう性に富む曲管に変形が集中することが知られているため、上述の研究は曲管部を対象に進められており曲管部の大変形曲げ実験や有限要素解析等により、曲げ変形を受ける場合はひずみ20%程度発生してもき裂・漏洩の発生がないこと、またそのレベルまでは有限要素解析が適用可能であることが明らかになった。さらに、地盤も含めてモデル化した有限要素解析により、埋設環境におかれた曲管を含む配管系の変形挙動を推定した結果、大規模な地盤変状が作用する場合、配管形状と入力する地盤変状の方向によっては曲管だけではなく直管にも大きな変形が発生する可能

性が指摘された⁷⁾⁹⁾。このような場合、曲管と同様に直管にも座屈や漏洩といった限界状態に至ることが考えられるため、配管系の変形特性を評価するためには、直管の大変形特性に関しても検討する必要がある。また、配管系を構成する直管と曲管の剛性のバランスが系全体の変形特性に大きく影響することも考えられる。これまでのところ、座屈に至るまでの直管の変形特性に関する検討²⁾¹⁰⁾¹¹⁾は詳細に行われているものの、大規模な地盤変状を想定した塑性変形に至る変形特性に関しては不明な点も多い。

そこで本研究では、埋設パイプラインに広く用いられる呼び径100AのSGP鋼管の大変形曲げ実験を行い、座屈後まで含めた直管の変形特性を定量的に把握することを試みた。供試管には円周方向溶接部を有するものも用意した。さらに、直管の曲げ変形特性に関して大変形領域までの有限要素解析の適用性について検討したので、以下に報告する。

2. 大変形曲げ実験

2.1 実験方法

供試管は、JIS G 3452に規定される配管用炭素鋼鋼管SGPである。表-1に供試管の形状および機械的性質を示す。表中の外径、管厚は後述するひずみゲージ貼付断面および貼付位置における測定値の平均値とした。外径および管厚の測定は実験前に行い、全ての

供試管において測定値が平均値の±0.1mm の範囲内にあることを確認した。機械的性質は JIS 12 号引張試験片を用いた管軸方向の値とした。

表一に実験条件を示す。Case3、4 では、実配管の接合部に対する評価を行うため、中央部に円周方向溶接を有する供試管を用いた。管の変形特性に及ぼす内圧の影響を調べるために、中圧ガス導管を想定して Case1、Case3 では最低使用圧力である 0.1MPa（大気圧）、Case2、4 では最高使用圧力の 1MPa（大気圧）を水压にて付与した。その際、アキュムレータを介して内圧を付与することにより、供試管が変形による内容積の変化が生じて、内圧は一定に保たれるようにした。

図一に実験装置を示す。供試管の長さは 1400mm であり、両端にフランジを溶接しフランジを介して載荷治具に接合した。載荷治具両端はピンで実験装置または油圧ジャッキに固定することにより回転を許容した。油圧ジャッキ側のピンに一方向変位を付与することにより、供試管に曲げ変形を加えた。実験装置の各部位は、供試体に比べて十分に高い剛性を有するように加工し、実験中に実験装置の細部が変形することのないように配慮した。また、管頂部を $\alpha=0^\circ$ 、管底部を $\alpha=180^\circ$ とし、油圧ジャッキ側から見て時計回りに管周方向位置 α を定義した。なお、供試管は電綫鋼管であるため管軸方向に溶接部を有する。Case1、2 の供試管は、 $\alpha=90^\circ$ に管軸方向溶接部が位置するように設置した。また、Case3、4 の供試管は、管軸方向溶接部が円周方向溶接部の左右で 180° ずれるように作製し、 $\alpha=90^\circ$ と 270° に位置するように設置した。

計測は、荷重、曲げ角度および工学ひずみについて行った。荷重 F は油圧ジャッキと供試管の間に設置したロードセルを用いて計測した。曲げ角度 ω は、図二に示す位置に設置した傾斜計で測定される ω_L 、 ω_R の和とした。供試体に作用する曲げモーメント M は (1) 式を用いて算出した。ここで、 Δ_g は供試管中央部より 150mm の位置に設置した傾斜計にて測定される角度 θ (θ_L 、 θ_R の和) に対して線形的に増加すると仮定して、実験前および実験後 ($\theta=\theta_{max}$) の形状から $\Delta_g-\theta$ 関係、すなわち式中の a 、 b を算出して求めた。

$$M = F \times L \text{ (kN} \cdot \text{m)} \cdots (1)$$

ここで、
$$L = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \text{ (m)}$$
$$\Delta_1 = 460 \times 10^{-3} \times \{\sin(\omega_L + \pi/8) + \sin(\omega_R + \pi/8)\} / 2 \text{ (m)}$$
$$\Delta_2 = 650 \times 10^{-3} \times (\sin \omega_L + \sin \omega_R) / 2 \text{ (m)}$$
$$\Delta_3 = a \times (\theta_L + \theta_R) + b \text{ (m)}$$

a 、 b ：実験前後の形状の差から算出

工学ひずみ ϵ は塑性域用ひずみゲージを用いて測

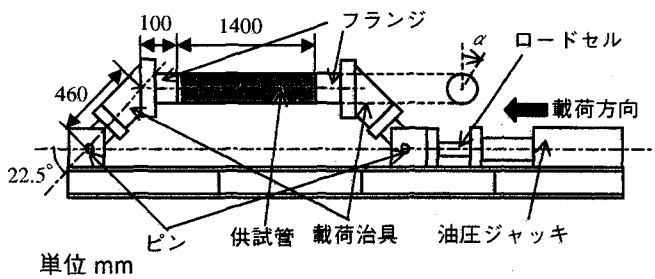
定した。ひずみゲージは図三に示す各断面の $\alpha=0^\circ \sim 90^\circ$ および $\alpha=120^\circ \sim 180^\circ$ の範囲は 15° 間隔、偏平によりひずみが卓越すると考えられる $\alpha=90^\circ \sim 110^\circ$ の範囲は 5° 間隔に管周および管軸方向に貼付した。なお、供試管の変形が大きくなるとひずみゲージの剥離や断線が生じるため適宜貼り替えを行った。実験は漏洩の発生、もしくは載荷治具の接触まで行った。また、その際の載荷速度は、地震時の地盤の変位速度レベルではパイプライン用鋼材の強度特性に及ぼす影響は小さいという報告¹²⁾を基に、約 1mm/sec に設定した。

表一 供試管の形状および機械的性質

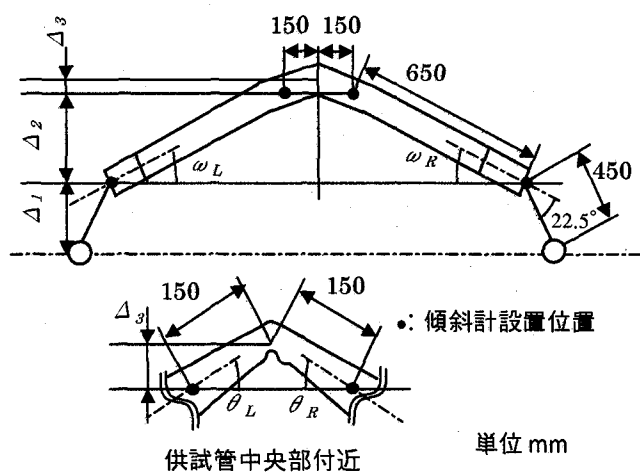
外径 (mm)	管厚 (mm)	長さ (mm)	0.5% 耐力 (MPa)	引張 強さ (MPa)	伸び (%)
114.3	4.2	1400	289	337	32

表二 実験条件

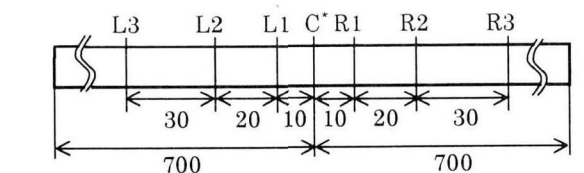
	円周方向溶接部の有無	内圧 (MPa)
Case1	無	0.1
Case2	無	1
Case3	有	0.1
Case4	有	1



図一 実験装置



図二 曲げ角度測定位置



*Case3、4では、C断面は円周方向溶接部に 単位 mm
あたるためひずみゲージを貼付しない

図-3 ひずみゲージ貼付断面

2.2 実験結果および考察

図-4 に実験における曲げモーメント M と曲げ角度 ω の関係を、図-5 にその際の供試管の変形状況を示す。最大曲げモーメント点までは各ケースの $M-\omega$ 関係は円周方向溶接部の有無によらずほぼ同等であり、その値は円周方向溶接部の無い供試管 (Case1、2) では $17\text{kN}\cdot\text{m}$ (Case1 では $\omega=20^\circ$ 、Case2 では $\omega=23^\circ$)、円周方向溶接部を有する供試管 (Case3、4) では $16\text{kN}\cdot$

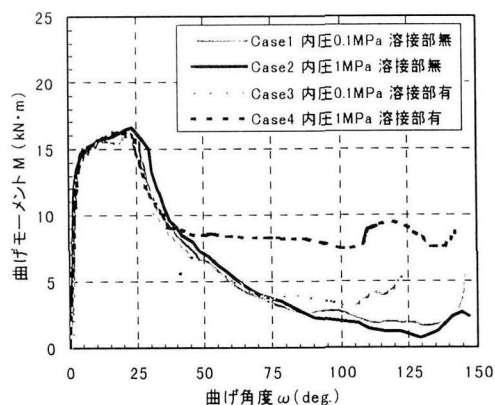


図-4 実験における $M-\omega$ 関係

m ($\omega=20^\circ$) であった。

また、図-5(a)に示すように、円周方向溶接部の無い供試管 (Case1、2) では、最大曲げモーメント点までは供試管全体に均一に曲げ変形が生じており、目視で確認できるような顕著な局所変形は確認されなかったが、円周方向溶接部有する供試管ではいずれも図-5(a)に示すような溶接部から 20mm 離れた位置でわ

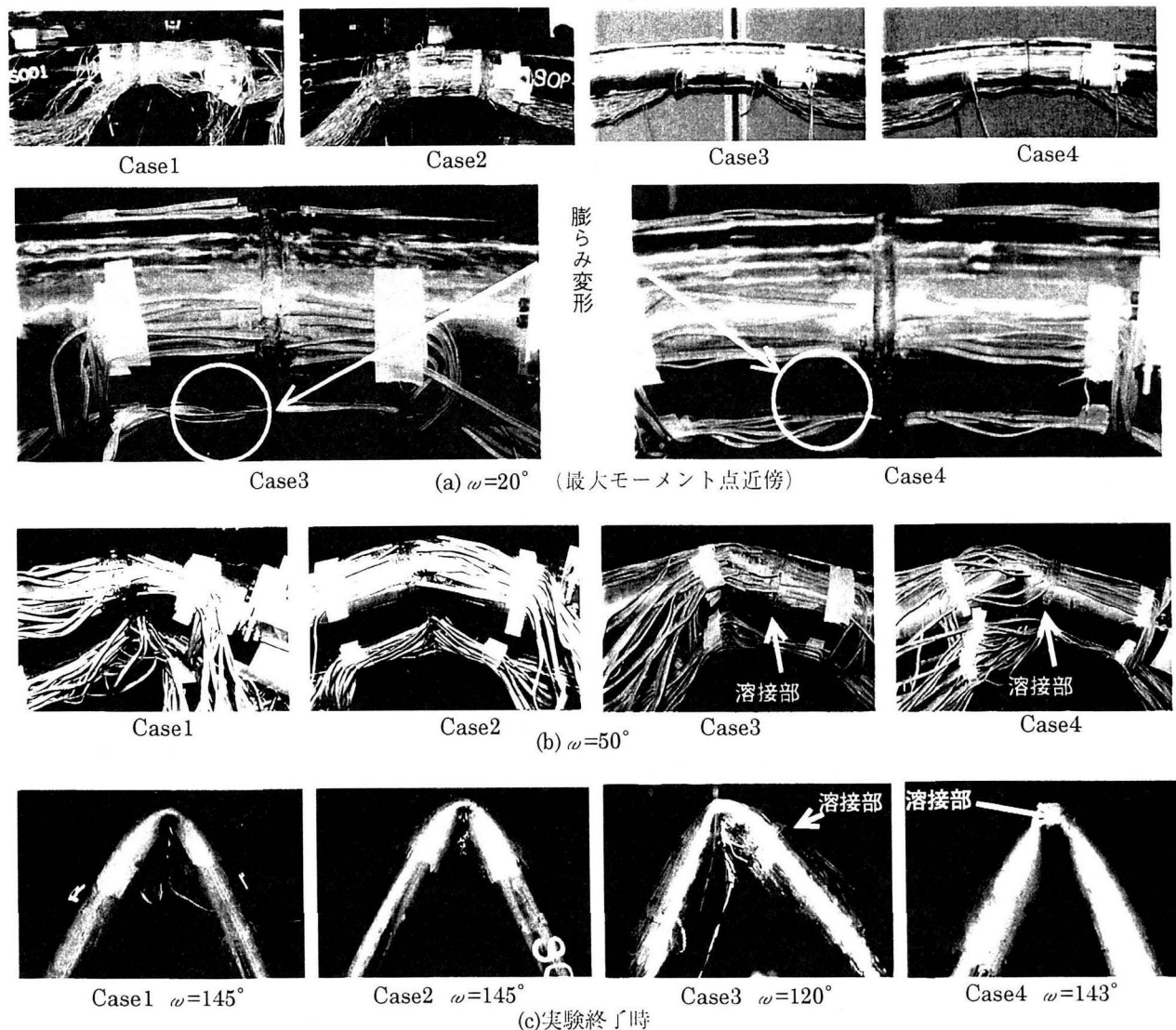
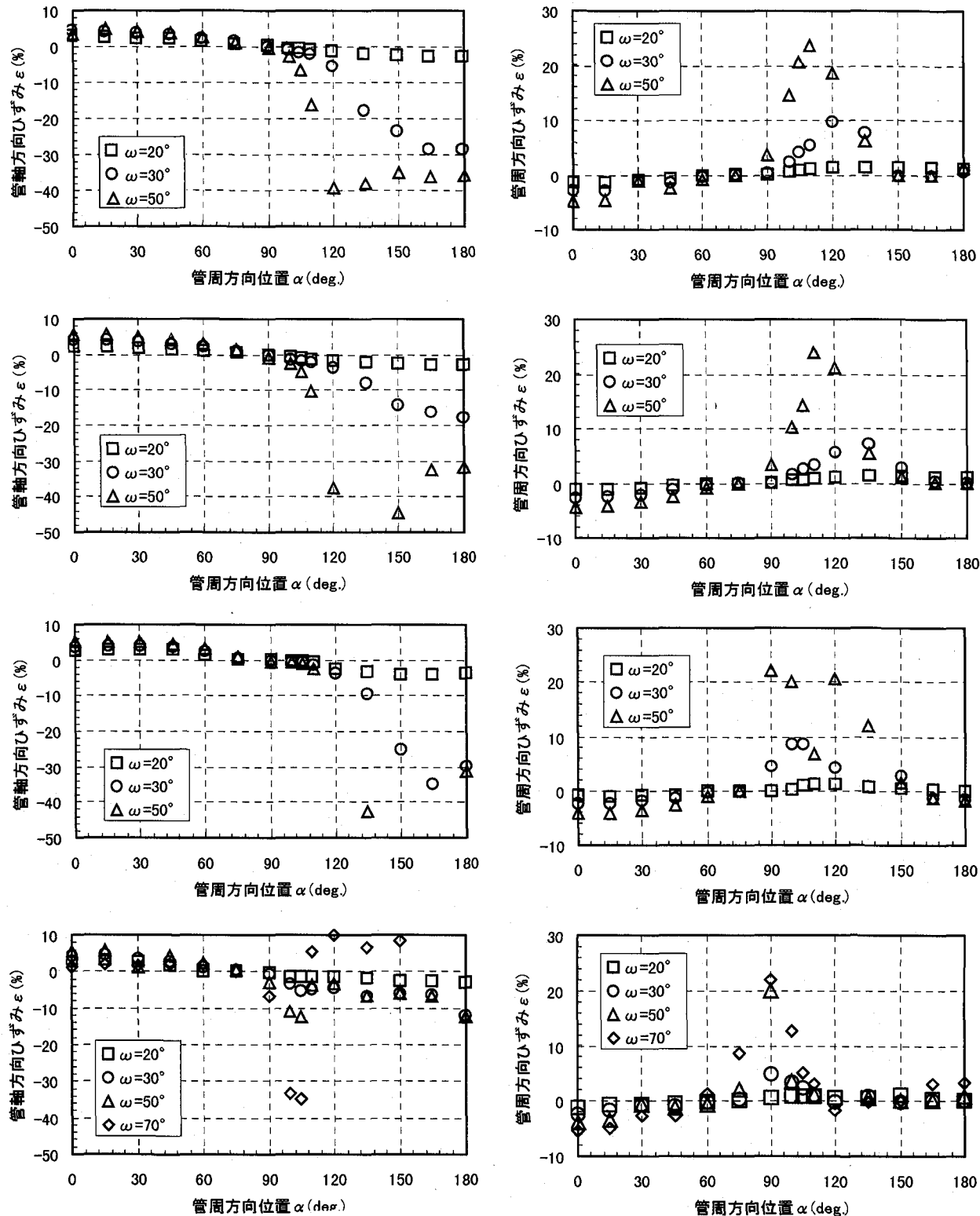


図-5 供試管の変形状況

ずかな膨らみ変形が生じた。最大曲げモーメント点以降は、図—5(b)に示すような局部変形が発生・進行し、 ω の増加に伴いその変形は大きくなったが、変形モードは実験条件により異なった。円周方向溶接部の無い Case1 および 2 では内圧の相違による変形モードの違いはみられず、供試管中央部近傍（中央部から約 0～10mm 離れた）断面で偏平が発生・進行し、その断面

の $\alpha=180^\circ$ の位置を中心にへこみが発生・進行した。一方、円周方向溶接部を有する Case3 および 4 では、最大曲げモーメント以降は両者ともに供試管中央部（溶接部）から 20mm 離れた断面を中心に約 40mm の範囲で前述した膨らみ変形が進行し、供試管中央部（溶接部）から約 30～60mm 離れた断面で偏平によるへこみが発生し始めたが、 $\omega=50^\circ$ になると、内圧



図—6 局部変形した断面のひずみ分布

0.1MPa の Case3 では膨らみが進行せずにへこみのみが進行したのに対し、内圧 1MPa の Case4 ではへこみとともに膨らみも進行し、異なる変形モードとなった。これらの円周方向溶接部の有無および内圧の相違による変形モードの違いについては、後述の有限要素解析の結果で考察する。

図一5(c)に実験終了時の変形状況を示す。Case1、2 は $\omega=145^\circ$ 、Case3 は $\omega=120^\circ$ 、Case4 は $\omega=143^\circ$ で治具の接触により载荷限界となったため実験を終了したが、全てのケースで漏洩は確認されなかった。その際の変形状況は、Case1～3 では前述したへこみが成長しそこで変形が集中し、最終的には折れ曲がるような形状となった。Case3 ではへこみが供試管中央（溶接部）から 60mm 離れた位置で発生したため、最終的には折れ曲がり状の変形は同位置で生じた。一方、Case4 ではへこみと膨らみがともに成長し溶接部を含む範囲で変形が進行した。なお、実験終了直前の Case1、2 の $\omega=130^\circ$ 、Case3 の $\omega=105^\circ$ 、Case4 の $\omega=110^\circ$ で曲げモーメントが増加したのは、折れ曲がる位置の両側の管外面が接触したためと考えられる。

図一6 は最も変形が集中した断面のひずみ分布を曲げ角度毎に示したものである。Case1 では C 断面、Case2 では L1 断面、Case3 では R3 断面、Case4 では R2 断面のひずみ分布を示した。前述した変形状況が類似している Case1、2、3 ではほぼ同様のひずみ分布となった。 $\omega=30^\circ$ では局部変形が発生しているため、 $\alpha=100\sim 180^\circ$ の範囲の管軸方向圧縮ひずみや $\alpha=90\sim 120^\circ$ の範囲の管周方向引張ひずみが卓越した。 $\omega=50^\circ$ では、管軸方向では-40% (Case1)、-45% (Case2)、-42% (Case3) の圧縮ひずみが発生し、管周方向では 24% (Case1、2)、22% (Case3) の引張ひずみが発生した。一方、変形状況が異なる Case4 では他のケースとは異なるひずみ分布となったが、 $\omega=70^\circ$ では管軸方向で-34%、管周方向で 22% のひずみが発生した。従って、全てのケースで局所ひずみの絶対値が 30% を十分に上回ような変形が発生したが、一方向への単調载荷の下では鋼管に漏洩は発生しないことが確認できた。なお、ひずみゲージが管の全表面に渡って貼付されていないことから、実際には測定値よりさらに大きなひずみが発生していた可能性もある。

3. 有限要素解析

3.1 解析条件

実験条件をモデル化した有限要素解析を実施し、実験結果と比較することにより、解析精度の検証を行った。最大曲げモーメント以降の挙動を再現するために、幾何学的非線形、有限ひずみを考慮した弾塑性大変形解析とした。解析には汎用の構造解析コードである

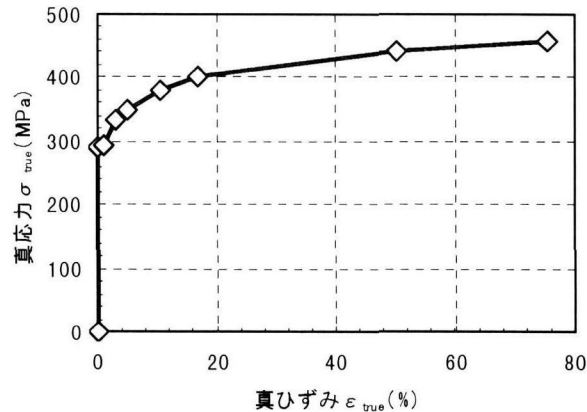
HKS 社製 ABAQUS ver.5.7¹³⁾を使用した。
材料特性については、表一1 に示した値を得た公称応力—公称ひずみ関係より算出した真応力—真ひずみ関係を多直線近似して入力した。引張試験では公称ひずみ 15%までの応力—ひずみ関係が得られたのみであるため、それ以降は、(2)式によって表される swift 則を仮定して真応力—真ひずみ関係を算出した。

$$s=c_1(c_2+e)^n\cdots(2)$$

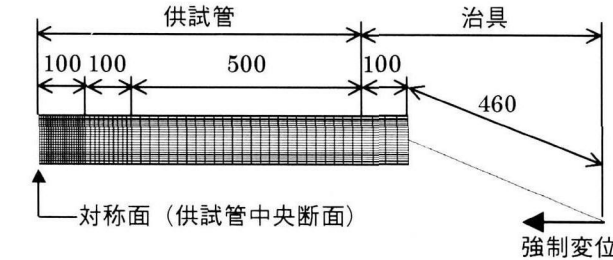
ここで、 s ：真応力 (MPa)、 c_1, c_2, n ：材料定数 ($c_1=486\text{MPa}$, $c_2=3.3\times 10^{-3}$, $n=0.11$)、 e ：真塑性ひずみ

図一7 に解析に使用した真応力—真ひずみ関係を示す。なお、同図中のプロットは、解析モデルに入力した値を示す。実験では膨らみやへこみの発生により局所変形部では引張・圧縮が繰り返される複雑な挙動を示すことが考えられるが、本解析では各部が一方向に変形を受けている範囲までを再現することを目的として、塑性モデルは von-Mises の降伏条件および等方硬化則とした。

図一8 に解析モデルを示す。供試管の外径、管厚は表一1 に示した値を用いた。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。解析モデルは管周方向は 6° 間隔、管軸方向は局所的な変形が発生する供試管中央断面より 100mm 以内の範囲は 5mm 間隔、100～200mm の範囲は 10mm 間隔、その他は 20mm 間隔の要素分割とした。また、円周方向溶接部を有するケースに関しては、供試管中央部の溶



図一7 解析に用いた応力—ひずみ関係



図一8 解析モデル

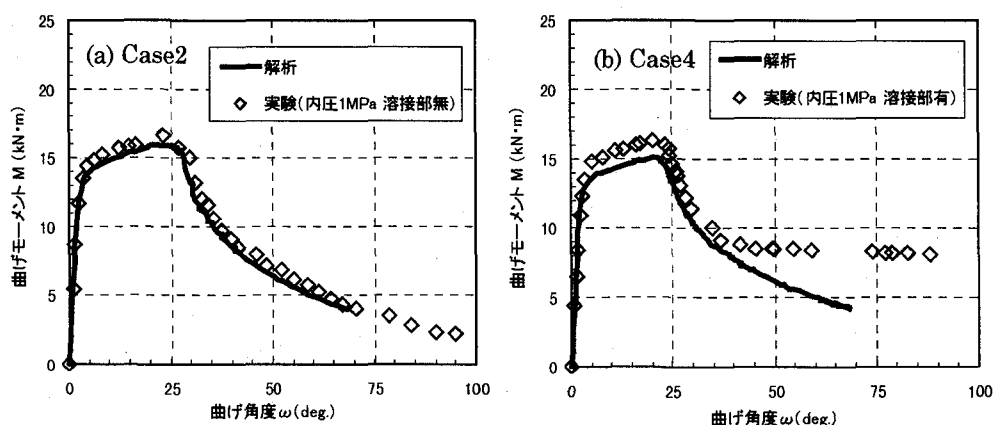
接部の幅に相当する 10mm の範囲では、管厚を実測に基づく 7.2mm と母材部と比較して厚くすることでモデル化した。また、本供試管では口径・管厚が小さいため溶接部の強度試験を実施することが不可能なため溶接部の材料特性はオーバーマッチングを仮定し、降伏応力および引張強さを母材部より 30MPa 上乗せした応力ひずみ関係を有すると仮定した。実験装置の载荷治具に相当する部分は、供試体と比較して十分に剛性が高いことから変形は生じないものとして、弾性係数を供試体の 100 倍に設定したシェル要素およびはり要素を用いてモデル化した。また、境界条件および形状ともに対称であると仮定して解析対象の 1/4 部分のみをモデル化した。なお、円周方向溶接部を有するケースの実験で確認された座屈後の左右非対称の変形を忠実に再現するためには、少なくとも解析対象の 1/2 をモデル化する必要がある。しかし、実験前の

外径・管厚測定により溶接部左右に顕著な形状不整が存在しなかったこと、供試管に存在したと考えられる溶接近傍の材料物性のばらつきをモデル化することは困難であることから、本解析では 1/4 モデルを採用し、非対称性が小さい領域までの変形挙動を再現することを目的とした。

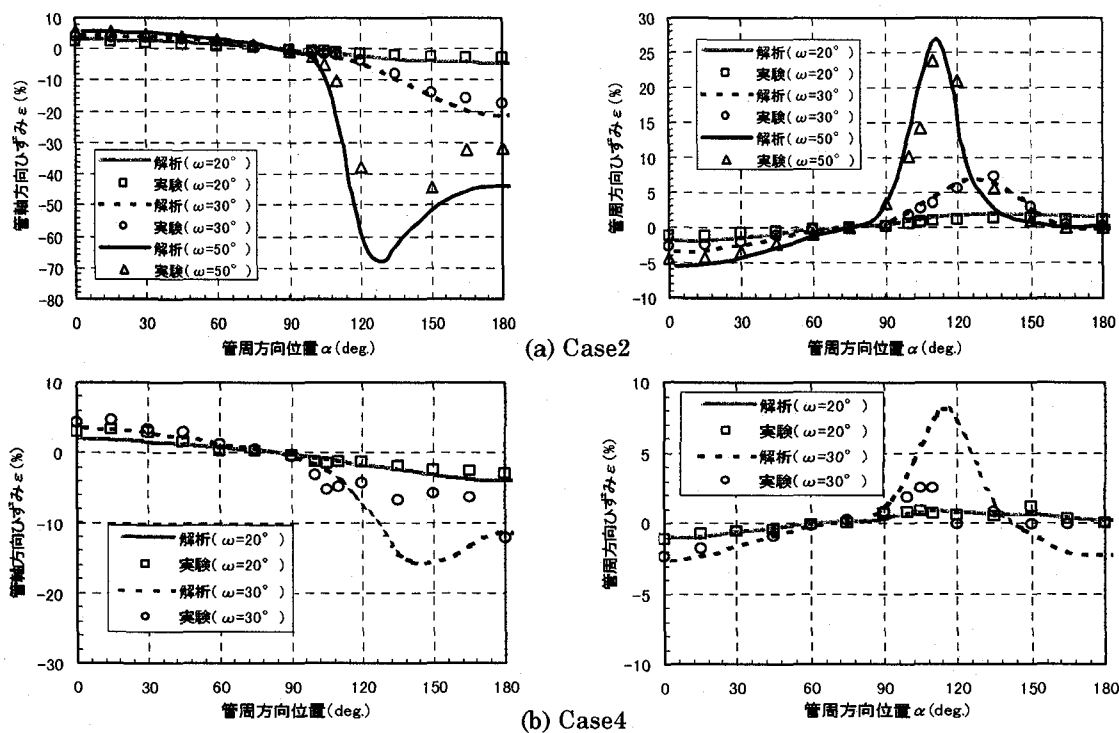
内圧は作用方向が供試管の回転に追従するように従動荷重として定義した。解析は実験と同様に内圧を荷重条件として付与した後に、油圧ジャッキの変位 δ に相当する強制変位を実験装置のピンにあたる位置に境界条件として与えて行った。

3.2 有限要素法解析の適用性について

本供試管での曲げ変形特性に関して有限要素法解析の適用限界を確認する目的で、円周方向溶接部の無



図一9 解析結果 ($M-\omega$ 関係)



図一10 解析結果 (ひずみ分布の比較)

い供試管（Case2）と有する供試管（Case4）の解析を行い実験結果と比較検討した。図—9 に曲げモーメント M と曲げ角度 ω の関係を示す。なお、同図にはそれぞれ比較のため前章で示した実験結果も合せて示している。円周方向溶接部の無い供試管（Case2）では最大曲げモーメント値およびその時の曲げ角度、さらには $\omega=65^\circ$ 程度まで M - ω 関係は解析と実験が良く一致した。一方、円周方向溶接部を有する供試管（Case4）では最大曲げモーメント値およびその時の曲げ角度、さらには $\omega=35^\circ$ 程度までの同関係は良く一致した。

図—10 に実験で変形が進行した断面 (Case2 では L1 断面、Case4 では R2 断面) におけるひずみ分布を示す。円周方向溶接部の無い供試管 (Case2) では $\omega=50^\circ$ までひずみ分布は解析と実験が良く一致した。特に管軸方向ひずみ分布の $\alpha=90\sim180^\circ$ 、管周方向ひずみ分布の $\alpha=90\sim150^\circ$ 位置におけるひずみ集中の様子が再現できた。また、円周方向溶接部を有する供試管 (Case4) では最大曲げモーメント点である $\omega=20^\circ$ でのひずみ分布は解析と実験が良く一致したが、 $\omega=30^\circ$ では、管軸方向ひずみ分布の $\alpha=90\sim180^\circ$ 、管周方向ひずみ分布の $\alpha=90\sim150^\circ$ 位置におけるひずみ集中の様子が再現できなかった。

表—3 に最大曲げモーメント点以降の変形図を示す。円周方向溶接部の無い供試管 (Case2) では、最大曲げモーメント点近傍では局所変形はみられず供試管全体に曲げ変形が生じ、その後変形が進行して $\omega=30^\circ$ では供試管中央部の $\alpha=180^\circ$ の位置を中心としてへこみ変形が生じ、その後 $\omega=50^\circ$ ではさらにそのへこみ変形が進行した。このような変形状況は、図—

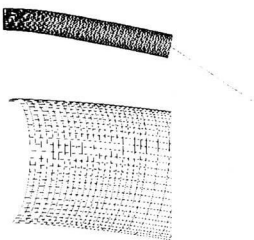
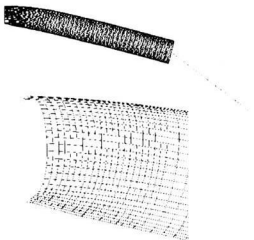
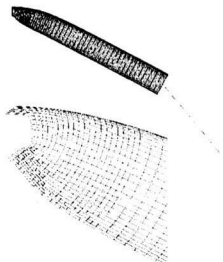
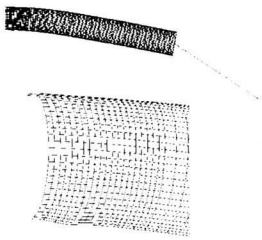
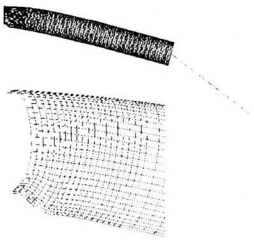
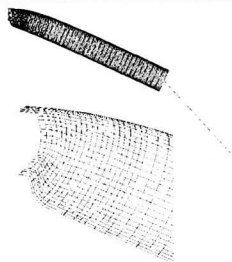
5 に示した実験結果と良く一致した。また、円周方向溶接部を有する供試管 (Case4) では、最大曲げモーメント点 ($\omega=20^\circ$) では溶接部から約 30mm 離れた位置でわずかな膨らみが発生するという変形状況は定性的には図—5 に示した実験結果を再現できた。しかし、さらに変形が進行し $\omega=30^\circ$ および 50° では、実験では図—5(c)に示したように膨らみ変形が進行し円周方向溶接部の左右で非対称になるのに対して、解析では円周方向溶接部を中心にへこみ変形が進行するといったように、本検討での有限要素解析では実験の変形状況を再現することはできなかった。

これらの検討結果から、曲げモーメント M と曲げ角度 ω の関係、局所変形発生断面でのひずみ分布および変形状況に関して、円周方向溶接部の無い供試管 (Case2) では $\omega=50^\circ$ まで、円周方向溶接部を有する供試管 (Case4) では最大曲げモーメント点 ($\omega=20^\circ$) まで有限要素法解析は実験と良く一致することが確認できた。

3.3 変形モードに及ぼす円周方向溶接部の影響

最大曲げモーメント点近傍の変形モードに及ぼす円周方向溶接部の影響について考察する。本実験方法では供試管中央部で曲げモーメントが最大になるため、円周方向溶接部の無い場合 (Case1 および 2) は供試管中央部で局所変形が発生・成長した。一方、円周方向溶接部を有する場合 (Case3 および 4) には、供試管中央部には、幅が約 10mm で余盛りおよび裏波を含めて厚さ約 7mm の溶接部が存在する。母材部の管厚は 4.2mm であること、また溶接部や溶接熱影響

表—3 解析結果（変形図）

	$\omega=20^\circ$ (最大曲げモーメント点近傍)	$\omega=30^\circ$	$\omega=50^\circ$
Case2 円周方向溶接部無			
Case4 円周方向溶接部有			

部は一般的に母材に比べて強度が大きいことから、母材部よりも円周方向溶接部の方が剛性が大きいと考えられる。従って、図—5 や表—3 に示したように、円周方向溶接部を有する場合では供試管中央部ではなく、そこから約 30~60mm 離れた断面で局部変形が発生したと考えられる。表—3 に示した変形図から、円周方向溶接部の強度および管厚を母材部よりも大きくした本解析によって、円周方向溶接部の有無による最大曲げモーメント点近傍での変形モードの差は定性的には再現できたことが分かる。

一方、本解析では最大曲げモーメント点以降の円周溶接部の左右で非対称となる変形までは再現することはできなかった。これは、解析対象の形状および境界条件が対称であると仮定して、1/4 モデルを使用したことに起因する。実際の供試管では溶接部およびその周辺の微小な材料強度や板厚分布もしくは真円度のばらつきが存在するために、溶接部の両側の強度や形状等は必ずしも対称ではない。実験ではこのような微小なばらつきのために比較的剛性が低くなった部位に変形が集中したと考えられる。従って、このような領域までの変形を解析によって再現するためには、円周方向溶接部や溶接熱影響部およびその周辺の母材部の材料強度、板厚分布もしくは真円度などに関してより正確な測定を行い、円周方向溶接部の左右における非対称性を考慮したモデル化が必要であることが示唆された。

4. 結 言

小口径ガス導管用鋼製直管の大変形曲げ特性を定量的に把握することを目的として、内圧 0.1 および 1MPa を付与して口径 114.3mm 管厚 4.2mm の直管を用いた大変形曲げ実験および有限要素解析を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 曲げモーメントと曲げ角度の関係は、最大曲げモーメント点 ($\omega=20\sim 23^\circ$) を上回る変形量である $\omega=25^\circ$ までは内圧の違いや円周方向溶接部の有無による相違は認められなかった。
- (2) いずれの実験条件でも治具が接触する角度 ($\omega=130\sim 145^\circ$) まで変形を付与したが貫通き裂・漏洩の発生はなかった。なお、その際の最大ひずみの絶対値は 30% 以上であった。
- (3) 円周方向溶接部の無い供試管では $\omega=50^\circ$ まで、円周方向溶接部を有する供試管では最大曲げモーメント点である $\omega=20^\circ$ までの曲げモーメントと曲げ角度の関係、局所変形発生断面でのひずみ分布および変形モードについて、有限要素解析と実験結果が良く一致した。また、円周方向溶接部の有無による最大曲げモーメント点直後の変形モードの相違も定性的にはあるが再現できた。

謝 辞

大変形曲げ実験の実施には東京理学検査(株)六谷英樹氏、有限要素解析の実施には(株)日本オープンシステムズの毛塚貴美子氏に多大なる協力を頂いた。また、東京ガス(株)小口憲武氏、増田智紀氏、安藤広和氏、吉崎浩司氏、細川直行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) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針、2000.
- 5) 日本道路協会：石油パイプライン技術基準(案)、1974.
- 6) 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.
- 7) 吉崎浩司、細川直行、安藤広和、小口憲武、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.
- 8) 細川直行、谷田部洋、渡辺孝仁：大口径ガス導管用鋼製曲管の面内曲げ特性、構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 17-24, 2000.
- 9) 高田至郎、鈴木崇伸、小池武、小川安雄、細川直行、北野哲司、岡村一男、桑嶋健：液状化側方流動を受ける埋設管の非線形挙動解析、構造工学論文集, Vol. 46A, pp.947-956, 2000.
- 10) Zimmerman, T. J. E. , Stephans, M. J., DeGeer, D. D., Chen, Q. : Compressive strain limits for buried pipelines , OMAE , vol. V-Pipeline Technology, ASME, pp.365-378, 1995.
- 11) Kulak, G. L., Murray, D. W., : Some test results for wrinkling of girth-welded line pipe, OMAE, vol. V-Pipeline Technology, ASME, pp.379-387, 1995.
- 12) 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.
- 13) Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc. : ABAQUS Standard User's Manual, ver. 5.7, 1999.

(2000 年 9 月 14 日 受付)