

地盤の大変位に対する曲管配管の変形特性

吉崎浩司¹・細川直行¹・安藤広和¹・小口憲武¹・曾我部潔²・濱田政則³

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

²工博 上智大学教授 理工学部機械工学科 (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町7-1)

³フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

地震時の大規模な地盤変位により、埋設ガスピープラインは大きく変形する可能性がある。そこで、特に変形が集中すると考えられる曲管部について、限界状態までの面内曲げ変形実験および有限要素解析を実施した結果、ひずみレベルで20%以上の変形性能を有すること、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分かった。更に大規模な地盤変位に対する、曲管部を有する埋設配管系の挙動について、筆者らの提案した解析手法を用いて検討を行った。その結果、配管系の中での曲管部の変形状態は、実験にて検証した曲管要素としての変形特性と概ね一致することが分かった。本手法により大変形領域までの定量的な耐震性評価が可能となった。

Key Words: pipeline, elbow, experiment, FEM, large deformation

1. 緒言

ガス輸送用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する可能性がある。従って、地盤震動や地割れなどの変状に対しては、ガス導管耐震設計指針^①により、その変形が規定される許容範囲内に収まるように設計を行っている。ところが、液状化に伴う側方流動のような、数メートルに及ぶ地盤変位に対しては、溶接接合鋼管の延性や配管の可とう性により、かなりの変位吸収能力があると予測されるものの、その定量的な評価手法は確立されていない。そのため現状では、新設のパイプラインの建設にあたっては、大規模地盤変位が予想される地域を避けること、また遮断バルブの設置などにより対応している。

1983年の日本海中部地震において、液状化に伴う地盤変位を受けた溶接接合鋼管のパイプラインに着目すると、特に曲管部およびその付近に被害が集中していることが報告されている^②。この理由としては、曲管部が直管部に比べたわみ易いことに加え、管の軸方向は地盤との間に滑りが生じる^③が、管の軸直角方向では作用する拘束力^{④・⑤}がそれに比して大きいため、管がある程度地盤変位に追従し、結果的に曲管部付近に変形が集中したためと推察される。従って、曲管部を有するパイプラインの地盤変位に対する耐震性を評価する際には、曲管部の変形特性

を評価することが不可欠である。特に、発生確率の低い高レベルの地震動に対しては、「変形はするが損壊はせず、二次災害を及ぼすおそれのないこと」がガス設備の確保すべき耐震性の目標とされており^⑥、大変形領域での変形特性や漏洩に到るまでの限界強度を定量評価する必要がある。

曲管部の変形特性については、弾性域の挙動はASME sec. III Div. I SubsectionNB^⑦に規定され、国内の基準としても石油パイプライン技術基準(案)^⑧、ガス導管耐震設計指針などに反映され、設計に使用されている。ところが塑性域、特に最大荷重・モーメント点を超える領域での挙動については、地震を想定した疲労特性を含め研究途上である^{⑨～⑪}。これまでのところ、ひずみの計測レベルは数%で、それ以降の限界状態までの挙動は漏洩の有無や偏平量の確認など定性的評価にとどまっている。

また埋設環境下の、曲管部を有する配管系の大変形挙動についての研究は、鈴木ら^⑫によって実験的に行われているが、ひずみレベルも最大で6%程度であるため、大規模な地盤変位に対する変形特性を把握するには、検討の余地がある。

そこで、ここでは溶接接合鋼管を対象として、実配管を用いた曲管の面内曲げ実験を行い、数10%レベルのひずみ計測を行うことにより、定量的に大変形特性を明らかにした。また、有限要素解析の適用性について検討を行った。更に埋設環境下における、

曲管部を有する配管系の挙動について、筆者らの提案した解析手法¹⁸⁾を用いた検討を行い、実験にて検証した曲管要素としての変形特性と比較することで、大規模な地盤変位に対する変形特性および耐震性について考察した。

2. 要素実験および有限要素解析

(1) 面内曲げ実験

a) 実験条件

曲管部の面内曲げ実験を実施した。対象は、中圧導管（内圧 0.1MPa 以上 1MPa 未満）に一般に用いられる曲管（JIS B2312）で、中心角は 90 度エルボとした。曲率半径は 1.5DR（管外径の 1.5 倍）、材質は STPT370（JIS G3456/引張強度:370MPa 以上、降伏応力:215MPa 以上）とし、口径は表-1 に示すように、100mm, 200mm, 300mm とした（以下、それぞれ $\phi 100\text{mm}$, $\phi 200\text{mm}$, $\phi 300\text{mm}$ とする）。あわせて外径、管厚および管径管厚比をまとめた。ただし、ここで示す外径は、実測値の平均値とした。また曲管の管厚については、熱間マンドレルによる製作のため、周方向の分布の傾向が供試体により異なったことから、ここでは同じく実測値の平均値を記した。

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、曲管の偏平が拘束されないように、曲管の両側に直管（材質:SGP, JIS G3452/引張強度:290MPa 以上）を溶接により接続した。なお直管の長さは、内曲げ時に油圧ジャッキのストローク 2m にて固定治具と移動治具が接触するまで実験が行えるよう、2.5D（管外径の 2.5 倍）とした。実験装置へ供試体を設置する際には、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より変位を付加して実験を行った。載荷速度については、既往の研究結果¹⁹⁾より、地震動程度に相当するひずみ速度以下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ため、ここでは準静的に、約 10mm/sec で行った。なお、地盤振動により内・外曲げが交互に作用することが考えられるが、設計上は疲労損傷度評価により、地盤振動に対する許容値を 1% と定めており¹¹⁾、本論文で論じているひずみレベルと比して十分小さい。よってここでは数メートルオーダーの一方向地盤変位を想定した曲管の変形特性を把握することに主眼を置き、実験は内・外曲げとも一方向に変形させた。

内圧については、中圧導管の最低使用圧力である 0.1MPa を窒素にて付加したケース（以下「内圧 0.1MPa」とする）、および中圧導管の最高使用圧力である 1MPa を水圧にて付加したケース（以下「内

表-1 供試体の口径および管厚

	口径	$\phi 100\text{mm}$	$\phi 200\text{mm}$	$\phi 300\text{mm}$
曲管	外径, D	116mm	218mm	320mm
	管厚, t	5.4mm	6.8mm	7.4mm
	管径管厚比 (D/t)	21	32	43
直管	管厚, t_s	4.1mm	5.2mm	6.5mm

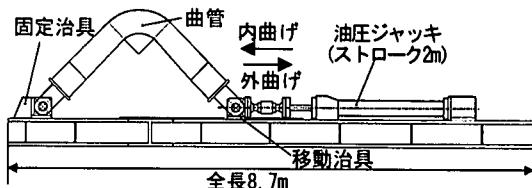


図-1 実験装置

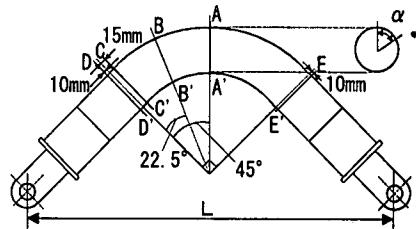


図-2 ひずみゲージ貼付断面

圧 1MPa」とする）について実験を実施した。内圧 1MPa の場合、変形に伴う内容積の変化が圧力に大きく影響するため、アクチュエータおよびバルブの開閉により圧力が一定値になるよう逐次調節した。また、内圧 1MPa の場合には限界まで曲げた状態で漏洩が生じなければ、更に 2MPa 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、圧力計およ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 に示す曲管の 5 断面に対して、管の周および軸方向にそれぞれ貼付した。ただし、特にひずみが局所的に卓越する部分には、断面内の周方向に $\phi 300\text{mm}$ で最小 2.5 度間隔、 $\phi 100\text{mm}$ および $\phi 200\text{mm}$ では 5 度間隔に配置した。計測数は最大で計 200 箇所に及んだ。なお、ひずみゲージについては 10%程度が測定限界であるため、限界値に達した場合には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実施した。

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、5 軸のエンコーダにより空間座標を計測する三次元形状測定器を用いて、偏平化等に伴う断面形状の変化を測定した。

実験は、内曲げについては供試体の両端が接触する（変位限界 2m）まで、外曲げについては油圧

表-2 実験結果のまとめ

		$\phi 100\text{mm}$	$\phi 200\text{mm}$	$\phi 300\text{mm}$
内曲げ 内圧 0.1MPa	最大ひずみ	25%(周)	28%(周)	25%(周)
	曲げ角度	78°	86°	81°
	き裂・漏洩	なし	なし	なし
内曲げ 内圧 1MPa	最大ひずみ	23%(周)	22%(周)	23%(周)
	曲げ角度	78°	83°	76°
	き裂・漏洩	なし	なし	なし
外曲げ 内圧 0.1MPa	最大ひずみ	40%(軸)	42%(軸)	33%以上(軸)
	曲げ角度	-44°	-33°	-44°
	き裂・漏洩	あり	あり	なし (荷重限界)
外曲げ 内圧 1MPa	最大ひずみ	32%*	18%(軸)	24%(軸)
	曲げ角度	-38°	-21°	-23°
	き裂・漏洩	あり	あり	あり

*のひずみ値は、数値解析結果

ジャッキの荷重限界 (490kN) まで変位を付加することを目標とした。ただし、途中でき裂、漏洩等が生じた場合にはその時点で終了した。

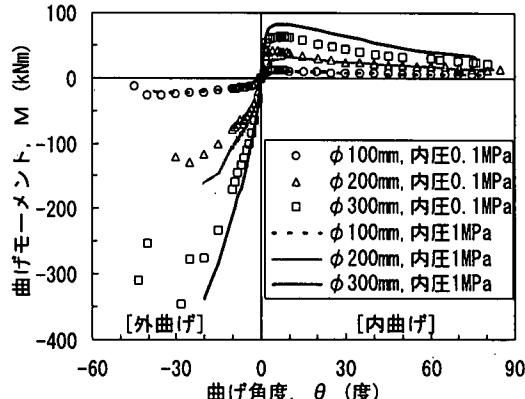
b) 実験結果および考察

実験結果を表-2にまとめる。このうち $\phi 100\text{mm}$ 外曲げ、内圧 1MPa の場合の最大ひずみについては、破断箇所のひずみがひずみゲージで取りきれなかったため、後述する数値解析の結果を記した。なおここでの大ひずみとは、測定された周または軸方向ひずみの絶対値の最大値であり、 $\phi 300\text{mm}$ 外曲げ、内圧 0.1MPa の場合は圧縮ひずみ、他は全て引張ひずみとなった。

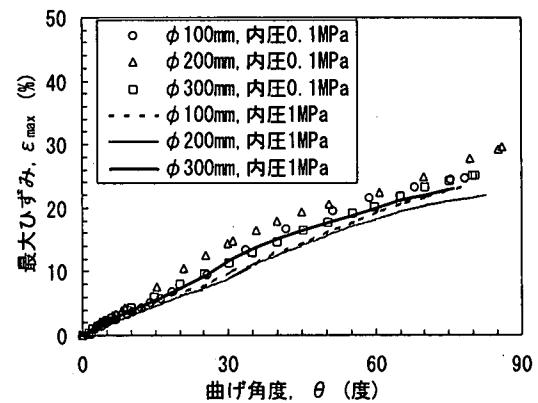
各ケース毎の曲げモーメント、最大ひずみと曲げ角度の関係を図-3に示す。外曲げの大ひずみについては、全口径について最大ひずみが計測された内圧 0.1MPa の結果を、曲管部・直管部に分けて表示した。ただし $\phi 300\text{mm}$ 外曲げ、内圧 0.1MPa については、座屈現象の発生に伴いひずみゲージの貼り替えが不可能となつたため、曲げ角度 -30 度以上では貼り替えを行わずにひずみ計測を続行した。従つて発生ひずみは、図-3(c)中の矢印にて示すように、更に大きい値であったと推察される。なお、ここでの曲げ角度 θ は、供試管を三角形と近似した場合の幾何学形状から、式(1)により算出した。

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

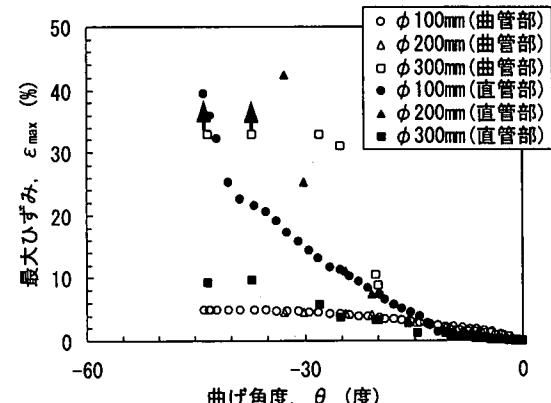
ここに示す L は図-2における初期状態での端部間距離であり、 δ はジャッキ変位である。



(a) 曲げモーメントと曲げ角度の関係



(b) 最大ひずみと曲げ角度の関係 (内曲げ)



(c) 最大ひずみと曲げ角度の関係 (外曲げ、内圧 0.1MPa)

図-3 実験結果(曲げモーメント、最大ひずみと曲げ角度)

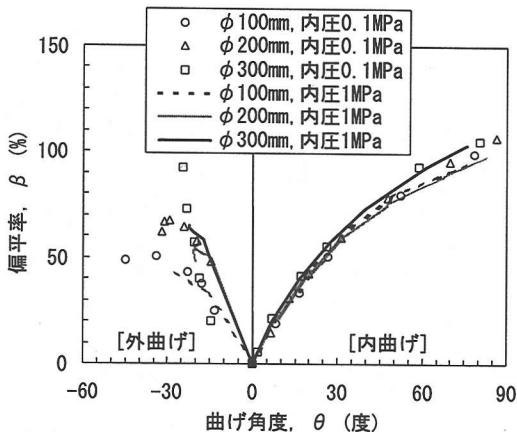


図-4 偏平率と曲げ角度の関係

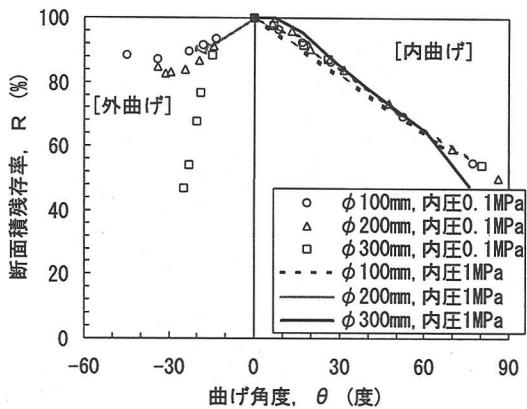


図-5 断面積残存率と曲げ角度の関係

また、各口径ごとの偏平率 β および断面積残存率 R を、それぞれ図-4および図-5に示す。ここで偏平率 β 、断面積残存率 R は式(2)、(3)にて表されるものとする。

$$\beta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{\bar{D}_0} \times 100 \quad (2)$$

$$R = \frac{A - \pi \cdot \bar{t} \cdot \bar{D}_0}{A_0 - \pi \cdot \bar{t} \cdot \bar{D}_0} \times 100 \quad (3)$$

ただし D_{\max} および D_{\min} は変形後の長径および短径、 \bar{D}_0 は変形前の外径の平均値である。また A は、中央断面について周方向 2.5 度おきに三次元形状測定器にて測定した断面の位置データから算出した断面積であり、 A_0 はその初期値である。また \bar{t} は、超音波厚さ計にて測定した管厚の平均値である。

変形状況について以下に示す。変形形状については、内曲げと外曲げで大きくその様相を異にした。内曲げについては、内圧の程度および口径によらず、変形としては曲管部、特に中央断面での偏平化が進

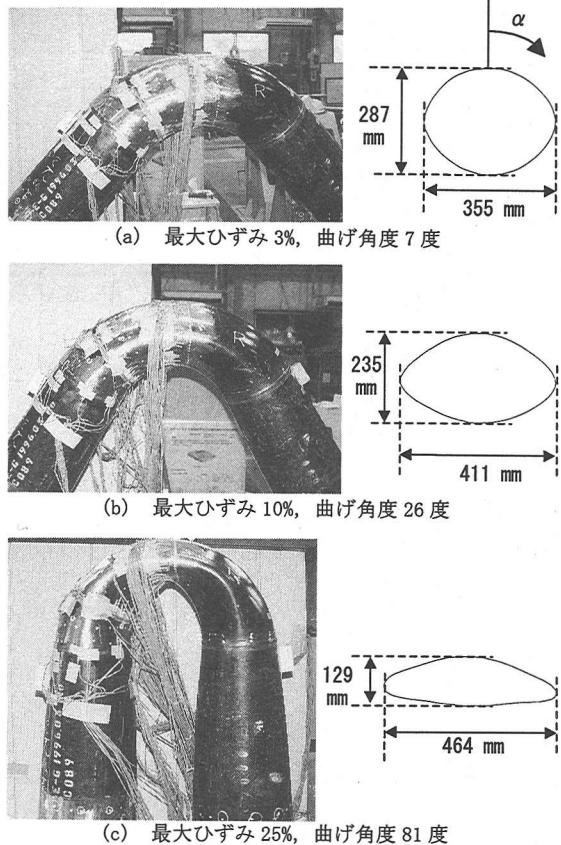
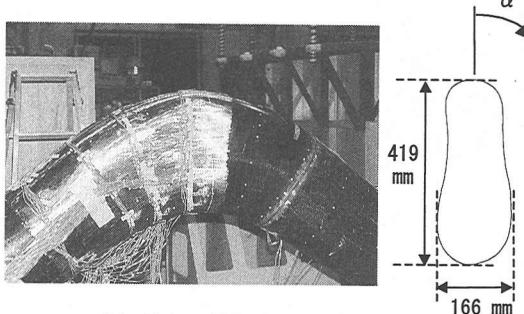


図-6 変形状況および中央断面形状

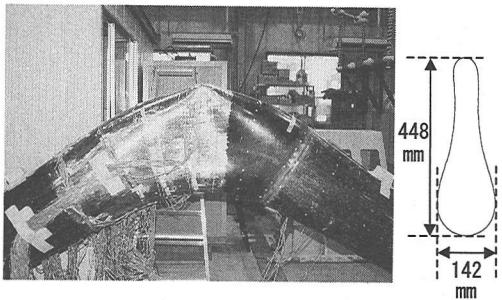
($\phi 300\text{mm}, \text{内圧 } 0.1\text{MPa, 内曲げ}$)

むのみで、直管端部の治具が接触するまで曲げてもき裂、漏洩等の発生は見られなかった。図-3(b)における最大ひずみは、曲管中央断面の $\alpha=90$ 度付近での周方向ひずみの値であり、当該箇所は板曲げに近い変形形状を示した。一例として、口径 $\phi 300\text{mm}$ 、内圧 0.1MPa での変形状況および中央断面形状を図-6 に示す。この図より、一方向の変形が進行するに従って、曲管中央部およびその付近での断面偏平化が著しく、局所的な座屈等は発生していないことが分かる。最終的には曲げ角度として約 80 度時に直管端部同士が接触するに至り 25% 程度のひずみが発生した時点を実験を終了した。

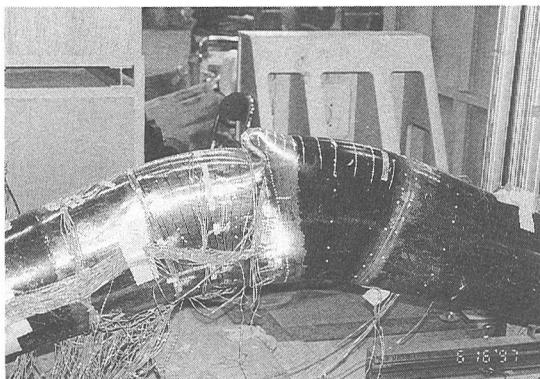
口径による違いについては、図-3に示すように、曲げモーメントは異なるが、最大ひずみには大きな差異はなかった。また内圧の影響については、内圧 1MPa の場合の最大ひずみが、内圧 0.1MPa に比べ若干ではあるが低くなる傾向が見られた。これは内圧により偏平化が抑制されたことによると考えられるが、図-4および図-5に示す偏平率 β および断面積残



(a) 最大ひずみ 10%, 曲げ角度-20 度



(b) 最大ひずみ 30%, 曲げ角度-25 度

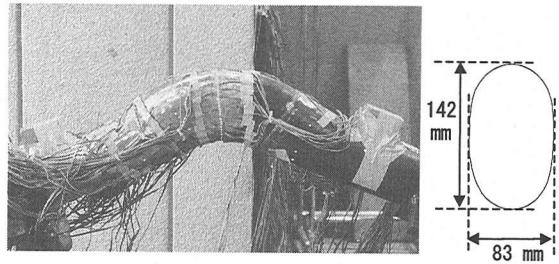


(c) 最大ひずみ 33%以上, 曲げ角度-44 度 (荷重限界)

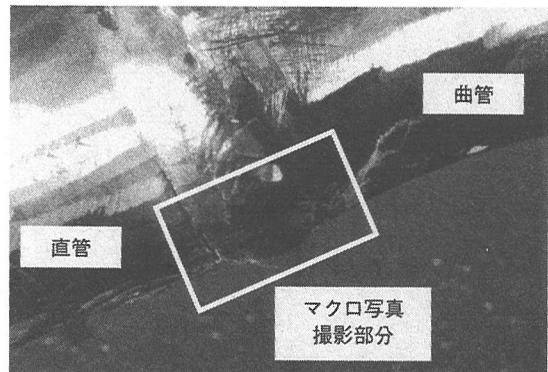
図-7 変形状況および中央断面形状
(ϕ 300mm, 内圧 0.1MPa, 外曲げ)

存率 R にはその違いが明確には現れず、ここで対象とした内圧レベルでは変形状況に与える影響はわずかであると考えられる。

一方、外曲げについては、口径、内圧により挙動が大きく異なった。 ϕ 300mm、内圧 0.1MPa では、図-7に示すように、曲管部中央にへこみが生じ、限界状態で同部 $\alpha=0$ 度付近に図-7(c)に示すような局部座屈が見られたが、き裂、漏洩等は発生せず、油圧ジャッキの荷重限界である 490kN に達したため実験を終了した。それに対し、 ϕ 100mm と ϕ 200mm では内



(a) 変形状況および中央断面形状
(最大ひずみ 40%, 曲げ角度-44 度)

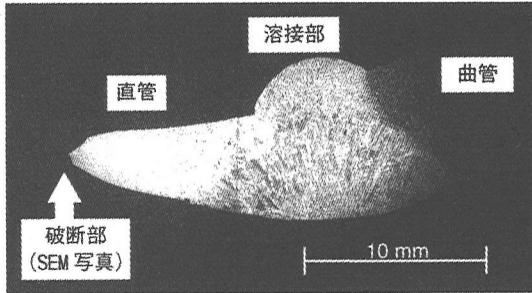


(b) き裂部付近の拡大図

図-8 変形状況およびき裂部拡大図
(ϕ 100mm, 内圧 0.1MPa, 外曲げ)

圧 0.1MPa、1MPa 共に、また ϕ 300mm では内圧 1MPa の場合、ある時点を境にして曲管部の変形が進行せず、直管部に変形が移行し、直管部 $\alpha=0$ 度付近に局部座屈が見られ、同部 $\alpha=180$ 度付近に破断を生じた。破断は $\alpha=180$ 度付近を起点として、約 1/3 周にわたって発生した。一例を、 ϕ 100mm、内圧 0.1MPa の場合について図-8に示す。き裂は曲管と直管の溶接部付近の直管部に生じた。破断部付近のマクロ写真および破面の SEM (走査電子顕微鏡) 写真を図-9に示す。破断の起点付近にて計測したひずみ値は、鋼材の破断ひずみに相当する 40%程度であり、き裂部は軸方向にくびれを生じ延性破面を呈していることからも、軸方向のひずみによる延性破壊であると考えられる。

これらの結果より、曲管部の長円化により曲げ剛性が上昇した後、曲管のへこみにより変位を吸収するか、直管の曲げ座屈に発展するかの挙動の違いについては、曲管の管径管厚比 (D/t) や、曲管と直管の曲げ剛性の違い、内圧の大きさなどに依存すると考えられる。



(a) 破断部付近のマクロ写真

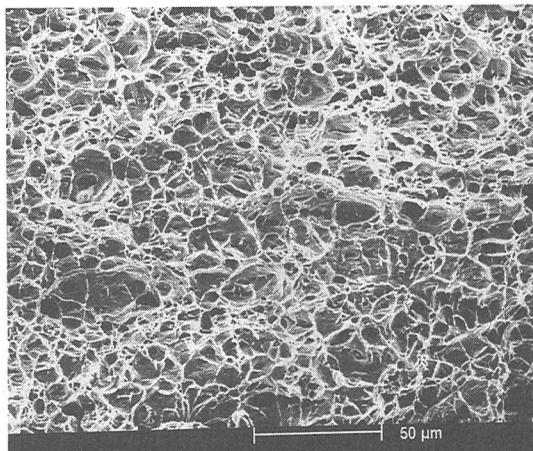


図-9 破断部付近のマクロ写真およびき裂部の破面
(φ100mm, 内圧 0.1MPa, 外曲げ)

(2) 有限要素解析

実験の信頼性および数値解析の適用性の検討を目的として、実験における配管形状、板厚、材料特性、境界条件をモデル化した三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-10に示す。モデルは対称性より1/4 モデルとした。要素分割については、周方向に72 分割とし、軸方向については、曲管部および曲管部近傍の直管部には要素の縦横比がほぼ 1:1 になるように、その他の直管部には縦横比が 1:5 になるように分割した。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の平均値を入力した。材料特性としては、製造を同じくする、同材料、同径の曲管、直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-ひずみ関係を図-11に示すようなマルチリニアモデルで近似し入力した。主な材料定数を表-3に示す。材料構成則は等方硬化則を用いた。また内圧も荷重条件として付与した。解析は、FEM 構造解析コード ABAQUS を用い、幾何学的非線形を考慮した弾塑性大変形解析とした。

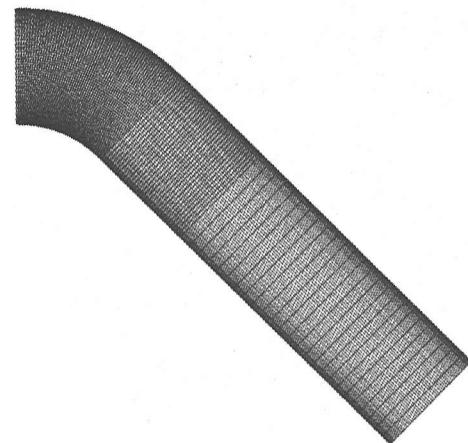


図-10 解析モデル(φ300mm)

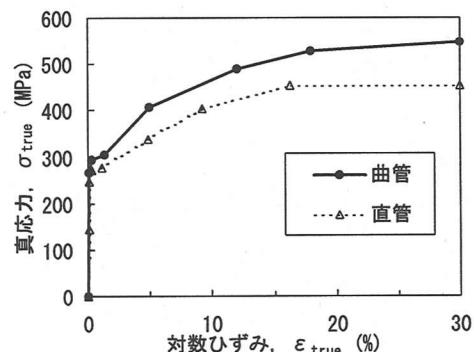


図-11 解析に用いた応力-ひずみ関係

表-3 解析に用いた材料定数

	曲管	直管
弾性係数 E [GPa]	206	206
ポアソン比 ν	0.3	0.3
降伏応力 σ _y [MPa]	294	270
引張強度 σ _t [MPa]	451	385

口径 φ300mm、内圧 0.1MPa の結果について、曲げモーメントと曲げ角度の関係を図-12に、最大ひずみと曲げ角度の関係を図-13に示す。内曲げ、外曲げ共に、実験と解析に良好な一致が見られ、ひずみについては 20% を越える領域までの FEM 解析の有効性が確認された。なお、外曲げ-30 度以降にて実験と解析に差異が見られるのは、実験において座屈現象が発生し、解析にて仮定した対称性が成り立たなくなつたからであると考えられる。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-14に示す。内曲げについては断面の偏平により、曲管の非線形を考慮した弾塑性大変形解析とした。

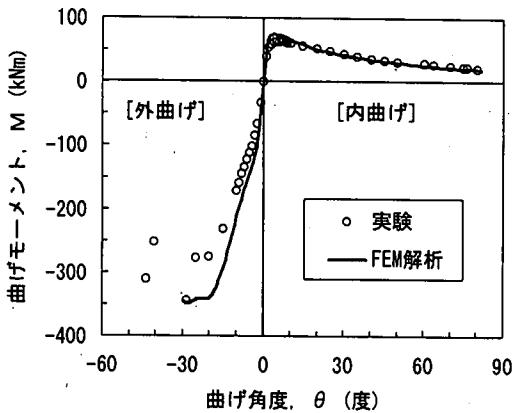


図-12 曲げモーメントと曲げ角度の関係
($\phi 300\text{mm}$, 内圧 0.1MPa)

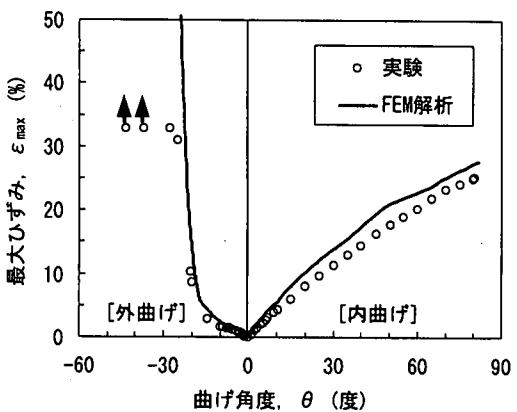
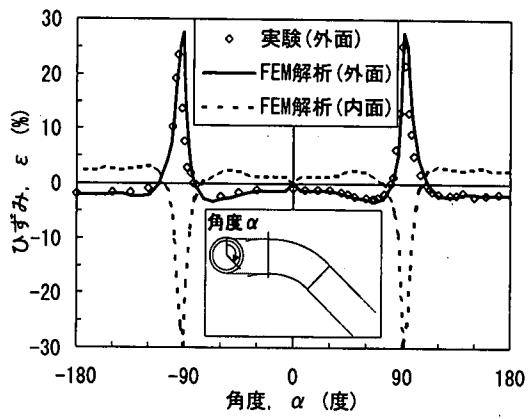


図-13 最大ひずみと曲げ角度の関係
($\phi 300\text{mm}$, 内圧 0.1MPa)

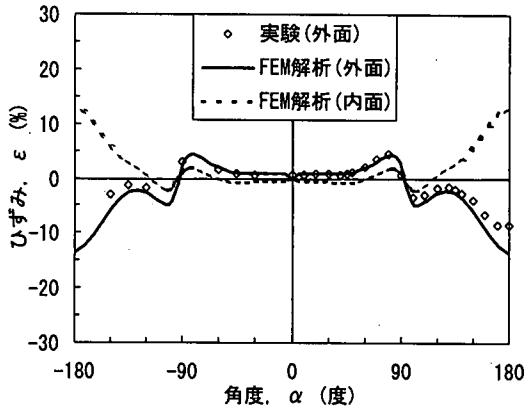
$\alpha = \pm 90$ 度付近に局所的に卓越した周方向の引張ひずみが発生しているが、解析結果はその挙動を忠実に評価している。なお図-14より、FEM 解析における周方向のひずみ分布は対称であり、実験結果もほぼ対称であることが分かる。

また外曲げにおいて口径 $\phi 300\text{mm}$, 内圧 0.1MPa と挙動の異なる口径 $\phi 100\text{mm}$, 内圧 0.1MPa の結果について、最大ひずみと曲げ角度の関係を図-15に示す。実験と解析に良好な一致が見られ、直管部に最大ひずみが移行する挙動も、解析にて評価することができた。

他口径、および内圧 1MPa の場合も同様に、実験と解析の間に良好な一致が見られた。特に、実験において内圧 0.1MPa と 1MPa にて挙動が大きく異なった $\phi 300\text{mm}$ の外曲げについても、図-16(a)に示す曲げモーメントをはじめ、図-16(b), (c)に示すように変形状況の違いまで再現することができた。ただしこのひずみ分布図においては、色が濃いほどひずみ値が大きいことを示している。



(a) 周方向ひずみ



(b) 軸方向ひずみ

図-14 中央断面のひずみ分布
($\phi 300\text{mm}$, 内圧 0.1MPa,
内曲げ, 曲げ角度 81 度)

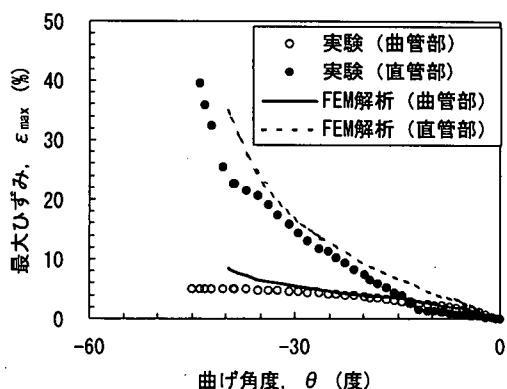
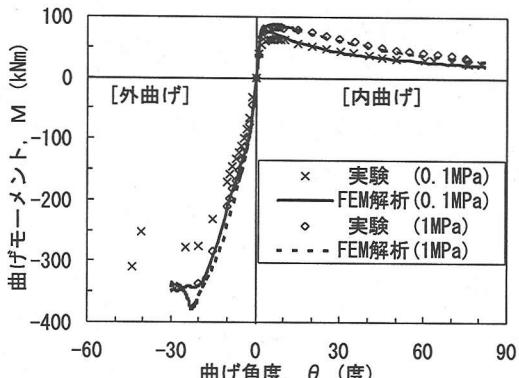
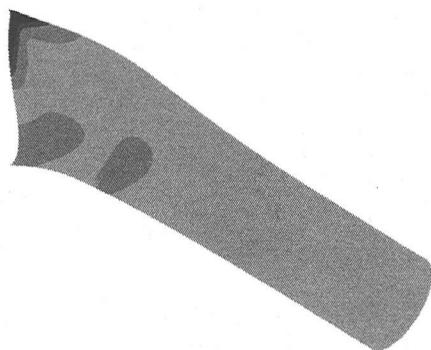


図-15 最大ひずみと曲げ角度の関係
($\phi 100\text{mm}$, 内圧 0.1MPa, 外曲げ)

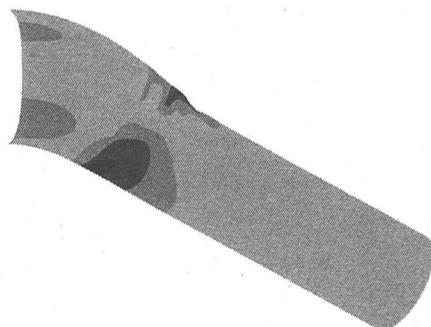
以上より、曲管部の曲げ変形特性については、ひずみレベルで 20% を越える領域まで FEM 解析が適用可能であることが確認された。



(a) 曲げモーメントと曲げ角度の関係



(b) ひずみ分布図（内圧 0.1MPa, 外曲げ-24 度）

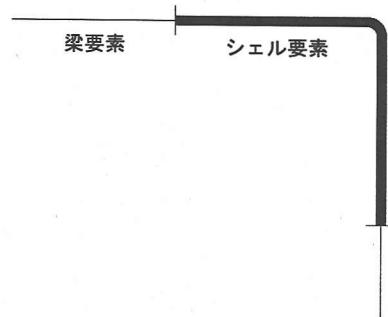


(c) ひずみ分布図（内圧 1MPa, 外曲げ-26 度）

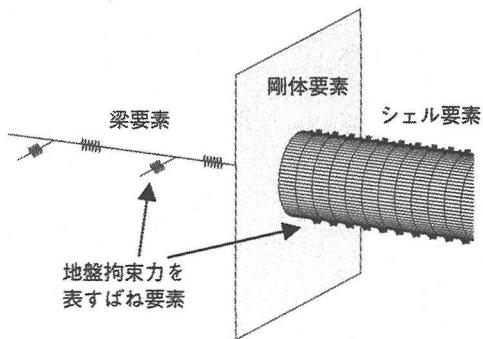
図-16 内圧による挙動の違い ($\phi 300\text{mm}$)

3. 地盤変位に対する曲管配管の変形特性

前章に示したように、曲管の大変形特性に対し、シェル要素を用いたFEM解析手法の有効性が確かめられた。次にそのFEM解析手法を用いて、曲管部を有する埋設配管の変形特性について検討を行った。



(a) 配管モデル（曲管部周辺）



(b) シェル要素と梁要素の接続部分のモデル化

図-17 シェル／梁ハイブリッドモデル

(1) 埋設配管のモデル化手法

局所的に変形が集中すると予想される曲管部およびその付近については、塑性ひずみ領域も定量的に評価できるシェル要素を用いることが望ましいことが明らかになった。しかし、それ以外の数百メートルに及ぶ配管系も全てシェル要素を用いてモデル化すると、要素数は数十万となり現状の計算機の能力では計算が非常に困難である。そこで筆者らは、変形の顕著な部分にはシェル要素、顕著でない部分には梁要素を用いた、シェル／梁ハイブリッドモデルを用いることが効率的でありかつ精度も低下しないことを明らかにしており¹⁸⁾、ここでも本モデルを採用することとした。図-17にシェル／梁ハイブリッドモデルを示す。梁要素とシェル要素の接合部については図中に示すように、剛体要素を用いることにより変形の連続性が損なわれないようなモデル化を行った。

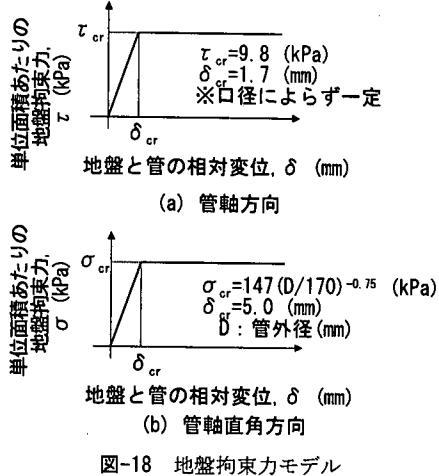


図-18 地盤拘束力モデル

管に及ぼす地盤の拘束力としては、ガス導管耐震設計指針に示される特性を参考にして、管軸方向および管軸直角方向について、図-18に示す特性を有する非線形ばねにてモデル化した。本来地盤は管の周りに連続的に分布しているが、梁部分については軸方向に離散化したばねにてモデル化した。またシェル部分については、軸方向および周方向に離散化したが、特に周方向については、16箇所に離散化したモデルにて解析を行った結果と、2箇所（管の直上、直下）に離散化して解析した結果に差異が見られなかったため、計算の効率化からも周方向に2箇所に離散化したモデルにて解析を行った。モデルの一部を図-17(b)に示す。

(2) 地盤変位の分布による影響度

地盤変位が埋設配管系に及ぼす影響について、地盤変位幅、地盤変位の分布形状をパラメータとした時の影響度を把握した。

対象とした埋設配管系は、図-19に示すように、曲管部を一つ有する口径 $\phi 300\text{mm}$ の配管系とし、地盤変位としては曲管部に最大地盤変位が作用するものとし、地盤変位幅は 25m, 50m, 100m, 200m とした。また分布形状は、曲管部を端部とする矩形分布、および曲管部に最大変位を生じるような三角形分布の 2 種類とした。最大地盤変位量は、鈴木らの知見²⁰⁾に基づき 2m とし、管に接続された、地盤拘束力に相当するばね要素の端部節点に強制変位の形で付与した。地盤変位のない箇所におけるばね要素の端部節点は固定した。

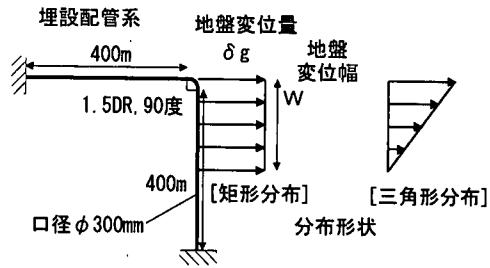


図-19 埋設配管系モデルおよび地盤変位のパラメータ

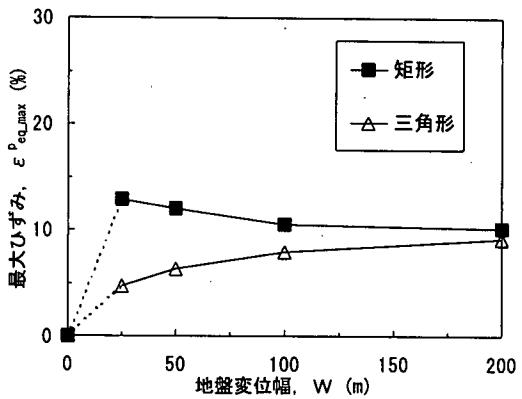


図-20 地盤変位幅、分布形状の影響

($\phi 300\text{mm}$, 地盤変位量 2m)

解析結果を図-20に示す。ここでは管外面に発生する相当塑性ひずみの最大値を最大ひずみとした。なお、相当塑性ひずみは式(4)にて表される値とする。

$$\varepsilon_{eq}^p = \sqrt{\frac{1}{3} \left\{ 4(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_x \cdot \varepsilon_y + \varepsilon_y^2) + \gamma_{xy}^2 \right\}} \quad (4)$$

これらの結果から、地盤変位幅が 200m 以上の場合には、曲管部を有する配管系に発生するひずみは、地盤変位幅、および地盤変位の分布形状にはあまり依存せず、曲管部周辺の地盤変位量に大きく依存すると考えられる。

(3) 埋設環境下での変形特性

次に、既往の研究成果により地盤変位を設定し、埋設環境下での曲管部の変形特性と要素特性との比較を行った。

地盤変位としては、濱田らの知見²¹⁾を参考に、図-21に示すような、直径 400m の円形の範囲に三角形にて分布する地盤変位を想定した。

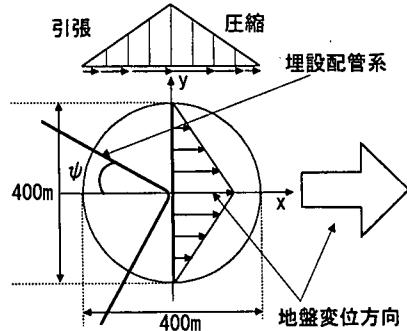


図-21 地盤変位の形状、方向および範囲

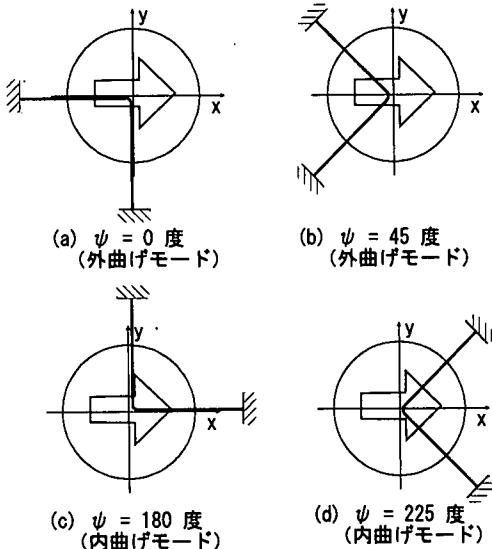


図-22 解析ケース

対象とした配管系は、曲げ実験を実施した口径 ϕ 300mm の配管とし、前項と同様に図-19に示す L 字形のものとした。材料特性については、図-11に示す応力一ひずみ関係、および表-3に示す材料定数を用いた。解析ケースとしては、地盤変位方向と配管系のなす角 ψ をパラメータとし、図-22に示すように、結果的に曲管に外曲げ変形を生じる $\psi=0$ 度および 45 度の場合（以下、外曲げモードとする）と、内曲げ変形を生じる $\psi=180$ 度および 225 度の場合（以下内曲げモードとする）の計 4 ケースについて検討を行った。

解析結果について、 $\psi=0, 45, 180, 225$ 度の場合のひずみ分布図をそれぞれ図-23(a), (b), (c), (d)に示す。ただし、いずれも最大地盤変位量が 2m の時の結果である。図の変形は実変形量であり、色が濃いほど大きなひずみを生じていることを表している。また最大ひずみと地盤変位量の関係を図-24に示す。

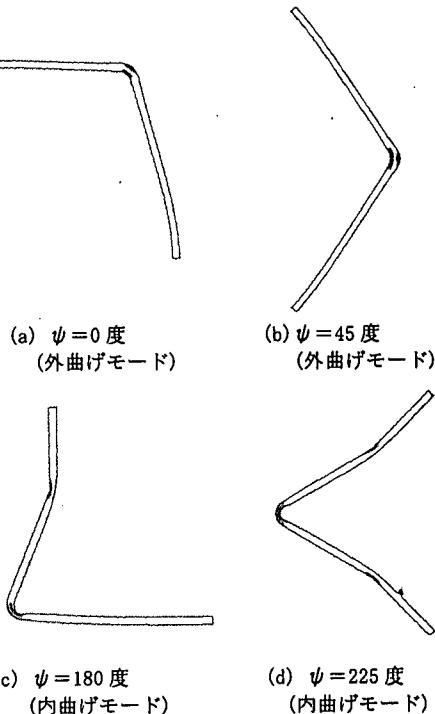


図-23 変形およびひずみ分布図

(ϕ 300mm, 地盤変位量 2m)

これらの結果より、口径 300mm、地盤変位 2m の本解析ケースの場合には、同じ地盤変位量に対しては、外曲げモードに比べ、内曲げモードの方が高いひずみが発生することが分かる。また、 $\psi=180$ 度の場合を除いては、曲管部に最大ひずみが発生しているのに対し、 $\psi=180$ 度の場合には、図-23(c)のひずみ分布に示すように、曲管から少し離れた箇所の直管に曲げが生じ、途中から直管部のひずみが大きくなることが分かる。

これらの解析における曲管部の曲げ角度と発生ひずみの関係を、実験にて検証した曲管要素としての曲げ変形特性と比較したものを図-25に示す。曲管部に着目した場合、埋設環境下での曲げ変形特性は、曲管要素の曲げ変形特性とほぼ一致することが分かる。このことより、曲管要素としての変形特性を把握しておくことが、同部を有する埋設配管系の耐震性能を評価する上で重要であることが分かった。また本手法を用いることにより、大変形領域での定量的な耐震性評価が可能となった。

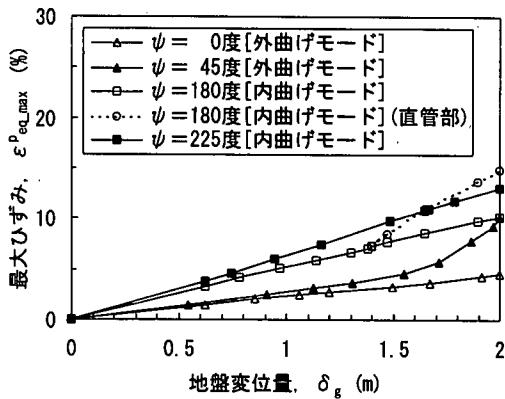


図-24 最大ひずみと地盤変位量の関係($\phi 300\text{mm}$)

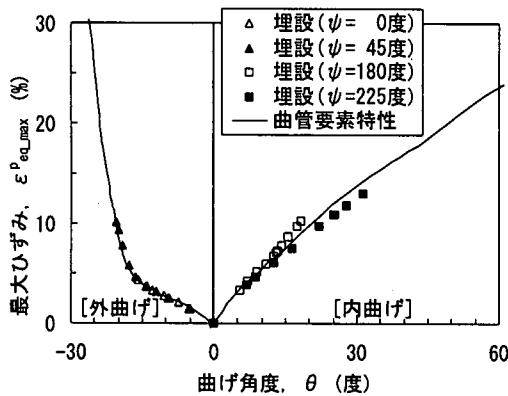


図-25 埋設状態での曲管部の曲げ変形特性と
曲管要素としての変形特性の比較
($\phi 300\text{mm}$)

4. 結言

地震時の液状化などによる地盤の大変位を想定し、パイプライン曲管部の変形特性について評価するために、面内曲げ実験および有限要素解析を実施した。また、その知見を反映し、埋設環境下での同部を有する配管系の変形挙動について解析的検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 曲管要素の大変形特性を、面内曲げ変形実験および有限要素解析で把握することができた。その結果、ひずみレベルで 20%以上の変形性能を有すること、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分かった。
- (2) 内曲げについては、曲管断面の偏平化が進むのみで座屈・漏洩等の発生はなく、最大ひずみは口径、内圧によらずほぼ一定であった。
- (3) 外曲げについては、曲管と直管の接続部付近の直管において引張り破断が生じ漏洩に至った

ものと、曲管部の座屈現象となり漏洩等の発生は見られなかったものと、挙動が大きく二分した。

- (4) 幅 200m 以上の地盤変位が生じた場合には、埋設環境下での曲管部を有する配管系の耐震性は、地盤変位幅や分布形状にはあまり依存しないことが分かった。また口径 300mm の埋設管に 2m の地盤変位量を付与した場合には、曲管が内曲げになるような地盤変位が作用した場合の方が、外曲げとなる場合よりもひずみが大きくなることが分かった。
- (5) 埋設配管系の中での曲管の変形特性は、実験にて検証した曲管要素の変形特性と概ね一致し、曲管要素としての変形特性を把握しておくことが、同部を有する埋設配管系の耐震性能を評価する上で重要であることが分かった。また本手法を用いることにより、大変形領域での定量的な耐震性評価が可能となった。

謝辞：本検討は社団法人日本内燃力発電設備協会に設置されているガス専焼発電設備用ガス供給系統評価委員会において、当該設備の評価に資する研究として実施したものである。実験の一部については、東京ガス株式会社、大阪ガス株式会社、東邦ガス株式会社の三社共同研究として実施したものである。また、実験を行うに当たり、東京ガス(株)の山川浩之氏、菅原廣氏、萩原直人氏、小林実央氏、谷田部洋氏に、計測・データ整理にあたっては東京理学検査(株)の江口道夫氏、萬田貴史氏、佐々木一哉氏、六谷英樹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す。

参考文献

- 1) 日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針，1982.
- 2) 日本ガス協会：日本海中部地震と都市ガス，1984.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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) ガス地震対策検討会：ガス地震対策検討会報告書, pp. 16-37, 1996.

- 7) ASME : ASME SECTION III DIVISION I - Subsection NB - 3653.2, SI-13.
- 8) 日本道路協会 : 石油パイプライン技術基準(案), 1974.
- 9) 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.
- 10) 大沢泰晴, 中野隆 : 配管要素の低サイクル疲労実験(完), 配管・装置・プラント技術, 1983.
- 11) 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.
- 12) Schmidt, L. C., Lu, J. P. and Morgan, P. R. : The influence on steel tubular strut load capacity of strain hardening, strain aging and the Bauschinger effect, *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 107-119, 1989.
- 13) Suzuki, N. and Nasu, M. : Nonlinear Analysis of Welded Elbows Subject to In-plane Bending, *Computers & Structures*, Vol. 32-No. 3/4, Pergamon Press, pp. 871-881, 1989.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 酒井理哉, 萩原豊, 山本祐祐 : 地震荷重下における薄肉エルボの限界耐力について, 電力中央研究所報告 U94012, 1994.
- 17) 小野芳美, 鈴木信久, 加藤昭彦, 吉川正樹 : 鋼製曲管の塑性域大変形挙動に及ぼす内圧の影響(第1報: 内曲げ変位負荷に対する解析的評価, 第2報: 外曲げ変位負荷に対する解析的評価), JSME 平成 8 年度材力講演会講演論文集, No. 96-10, Vol. B, 1996.
- 18) Yoshizaki, K. and Oguchi, N. : Estimation of the deformation behavior of elbows for an earthquake-resistant design, *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, No. 1783, 1996.
- 19) 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.
- 20) 鈴木信久, 中根宏行 : 埋設パイプラインの耐震性評価における地盤の永久変位分布のモデル化, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 1365-1376, 1990.
- 21) 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利 : 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文報告集, No. 736, III-6, pp. 211-220, 1986.

(1998.10.14 受付)

DEFORMATION BEHAVIOR OF BURIED PIPELINES WITH ELBOWS SUBJECTED TO LARGE GROUND DISPLACEMENT

Koji YOSHIZAKI, Naoyuki HOSOKAWA, Hirokazu ANDO, Noritake OGUCHI,
Kiyoshi SOGABE and Masanori HAMADA

A study has been carried out to evaluate the earthquake-resistance of buried gas pipelines subjected to lateral ground displacement due to ground liquefaction during earthquakes. In-plane bending experiments were conducted in the closing and opening direction for various kinds of elbows, where deformation are likely to concentrate. An FEA (Finite Element Analysis) were also carried out to represent the deformation behavior of the elbows using linear shell elements, and the validity of the numerical modeling technique over 20% of plastic strain was demonstrated. Furthermore, an analytical study was demonstrated for the evaluation of the deformation behavior of a typical buried pipeline with an elbow.