

都市ガス用小口径配管の一方向地盤変位吸収能力に及ぼす 曲管部と直管部の強度差と板厚差の影響

Influence of the difference in the wall thickness and strength between the elbow and the straight pipe on the earthquake-resistance of small diameter gas pipelines subjected to permanent ground deformation

橋本 義和*, 谷田部 洋*, 福田 直樹*, 吉崎 浩司*

Yoshikazu HASHIMOTO, Hiroshi YATABE, Naoki FUKUDA, Koji YOSHIKAZI

*東京ガス(株) 技術開発部パイプライン技術センター (〒230-0045 神奈川県横浜市鶴見区末広町 1-7-7)

In this study, small diameter gas pipelines with elbows which had the same wall thickness and strength as the straight pipes were analytically and experimentally evaluated. Good agreement was obtained between the analytical and experimental results, even for plastic deformation as much as 20% strain. Analytical study was also conducted to evaluate the effect of the difference in the wall thickness and strength between the elbow and the straight pipe on the earthquake-resistance of typical pipeline with an elbow.

Key Words: small diameter pipelines, elbow, wall thickness, earthquake-resistance

キーワード: 小口径配管, 曲管, 板厚, 耐震性

1. 緒 言

埋設配管は地震時に周囲の地盤変位に伴い変形する可能性がある。特に、液状化側方流動や地すべりのような現象では、数 m に及ぶ一方向地盤変位が観測されており¹⁾、過去の事例によると、溶接配管では直管部よりも可とう性に富む曲管部およびその付近に被害が集中している²⁾。したがって、埋設配管が数 m におよぶ大規模な地盤変位を受けた場合を想定して、周囲の直管部を含む曲管部近傍の変形性能を定量的に把握しておくことは重要である。

このような背景のもと、吉崎らは、中圧ガス導管を対象として、直管部に SGP (JIS G3452)、曲管部に直管よりも強度が高く板厚が厚い PT370 (JIS B2312) を用いた試験体により面内曲げ実験を実施した。その結果、一方向地盤変位下における曲管部近傍の変形性能を明らかにし、曲管部には局所的なひずみが 20%程度に達してもき裂、漏洩の発生がないこと、さらには、そのレベルの変形挙動の評価に有限要素解析 (以下、FEM 解析) が適用可能であることを確認した³⁾⁻⁵⁾。さらに、これらの検討により、ガス導管用曲管の中心角が減少する方向に変形を受ける場合 (内曲げ) では、実験条件に依らず同様の変形挙動となる一方で、曲管の中心角が増大する方向に変形を受ける場合 (外曲げ) では、曲管部との溶接線近傍の直管部に変形が集中する場合と、曲管部中央断面での変形が支配的となる場合の 2 通りがあ

ること、ならびに変形挙動によって漏洩限界にも変化が生じることが確認された。

細川らは、このような外曲げの変形挙動の相違には、内圧、初期断面形状、外径板厚比 (D/t) が影響することを明らかにした⁶⁾。また、変形挙動に大きく影響すると考えられる曲管とその周囲の直管の強度および板厚差については、直管の板厚のみを変化させた解析的検討はあるものの⁵⁾、実験による評価は行われておらず、未解明な点が多い。したがって、曲管部近傍の変形性能を定量的に評価するためには、上述の取り組みに加えて曲管部を構成する部材である直管と曲管の強度および板厚差に注目した実験を含めた検討も実施する必要がある。

そこで本研究では、SGP 直管および SGP 直管と強度、板厚が同程度の FSGP (JIS B2311) 曲管からなる試験体を用いて面内曲げ実験を実施し、その変形性能を PT370 の研究結果と比較するとともに、PT370 での検討と同様にひずみ 20%程度までの変形挙動を評価する手法としての FEM 解析の適用性を検討した。さらに、埋設状態での評価として、周辺地盤の拘束力をモデル化した FEM 解析により、液状化による一方向地盤変位に対して直管と曲管の強度および板厚差が変形性能におよぼす差異を定量化するとともに耐震性を評価した。

なお、本論文の 2 章に示した実験結果の一部と、2.2.5 項に示した考察は著者らの既報^{7),8)}で述べられている。

2. FSGP の面内曲げ特性

2.1 実験および FEM 解析手法

2.1.1 供試管

FSGP の面内曲げ実験を実施した。対象は中心角 90° のロングエルボとし、外径は 114mm とした。供試管に用いたものと同ロットの FSGP から採取した試験片により、引張試験を実施した。その結果を Table 1 に示す。Table 1 には吉崎らが実施した PT370 の結果も併記した。Table 2 に本実験で使用する曲管および直管の化学成分を示す。

実験前に計 4 体の供試管の外径および板厚を測定した。測定位置は Fig.1 に示す A 断面（エルボ中央断面）、B 断面（A 断面から 22.5° 断面）、C 断面（エルボ端部から 15mm 断面）および D 断面とした。なお D 断面（直管端部から 10mm 断面）はエルボに溶接した SGP 直管である。その結果、外径については全ての供試管について顕著な偏平は確認されず、板厚分布についても同様の傾向であることを確認した。また、Table 1 に外径および板厚の測定結果の平均値を併記する。

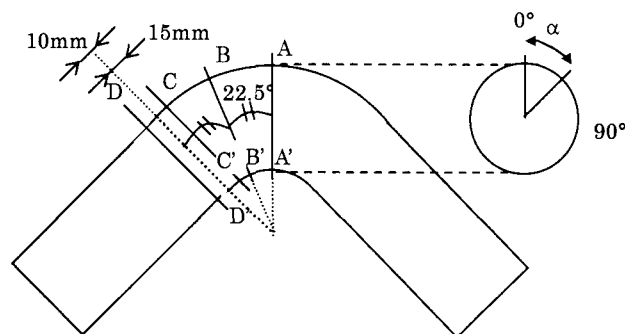


Fig.1 Definition of pipe cross-section

Table1 The geometry and tensile properties of the specimens

Material		D (mm)	t (mm)	D/t	σ_y (MPa)	σ_T (MPa)
FSGP	Elbow	114	4.5	25	319	378
PT370 ³⁾	Elbow	116	5.4	21	294	451
SGP	Straight pipe	115	4.2	27	318	398

D: The outer diameter, t: The wall thickness

Table 2 Chemical composition of the specimens (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu
FSGP Elbow	0.054	0.01	0.33	0.018	0.006	0.02	0.02
SGP Straight pipe	0.050	0.01	0.35	0.014	0.002	0.19	0.22

2.1.2 実験手法

実験装置を Fig.2 に示す。供試管は、曲管の偏平が拘束されないように、曲管の両側に SGP 直管を溶接

により接続した。実験装置へ供試管を設置する際には、面内の回転のみになるよう固定し、一端に対し油圧ジャッキにより変位を付加して実験を行った。载荷速度については、既往の研究結果⁹⁾より、液状化時の地盤変動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 0.1mm/sec で実施した。内曲げについては供試管の両端が接触するまで、外曲げについては油圧ジャッキの荷重限界 (490kN) となるまで変位を付与した。

内圧は、漏洩を検知するために 0.1MPa を窒素にて付与したケース（以下「内圧 0.1MPa 」）、および中圧導管の最高使用圧力である 1MPa を水圧にて付与したケース（以下「内圧 1MPa 」）とした。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、アキュムレーターおよびバルブの開閉により圧力を一定に保った。

ロードセル、変位計、圧力計およびひずみゲージを用いてデータを計測した。ひずみゲージは最大で Fig.1 で定義した曲管および直管の 12 断面について、管の周および軸方向にそれぞれ貼付した。特にひずみが局所的に卓越すると予想される部分には、断面内の周方向に 5° 間隔に配置した。なお、ひずみゲージについては 10% 程度が測定限界となるため、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。

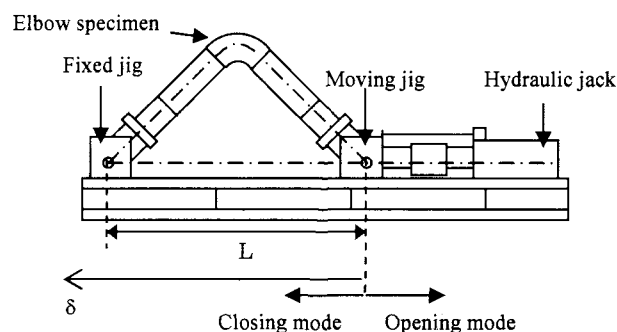


Fig.2 Experimental setup

2.1.3 解析手法

実験条件をモデル化した FEM 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。FEM 解析は汎用コード ABAQUS ver.6.3 を用いて実施し、偏平や局部座屈を再現するために幾何学的非線形性を考慮した弾塑性解析とした。

解析モデルを Fig.3 に示す。外径は 114mm とし、板厚は Table 1 に示した供試管の実板厚の平均値を用いた。要素には 4 節点のシェル要素を用いた。モデルは対称性を考慮して $1/4$ モデルとした。要素分割については、周方向に 48 分割とし、軸方向については、変

形が集中すると予想される曲管部および曲管部近傍の直管部では要素の縦横比がほぼ 1:1 となるように、その他の直管では縦横比が 1:5 となるように分割した。

材料特性は、供試管に用いたものと同ロットの曲管および直管から採取した試験片により実施した引張試験のデータを基に、Fig.4 に示す通りとした。弾性域での機械的性質は、ヤング率を 205.8GPa、ポアソン比は 0.3 とした。降伏条件は von Mises の等方硬化則を適用した。

実験と同様に供試管に内圧 1MPa および 0.1MPa を付与した後に、供試管と油圧ジャッキの接合部に相当する節点に強制変位を入力した。なお、実験において治具に相当する部位では剛性が高く変形しないことをモデル化するため、ヤング率を供試体の 10 倍とした。

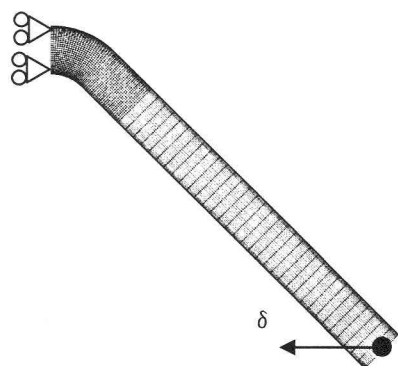


Fig.3 FE model

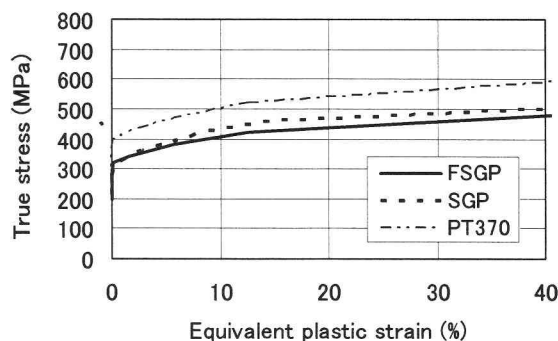


Fig.4 The tensile properties for FE-analyses

2.2 結果および考察

2.2.1 変形挙動について

内曲げ外曲げともに、内圧 0.1MPa と内圧 1MPa で同様の変形となったため、以下に内圧 1MPa の変形挙動をまとめる。

(a) 内曲げ

Fig.5 (b)に变形状況を示す。一方向変位の増加に伴い、A 断面およびその付近での偏平が進行した。最終的には Fig.5(b)に示す曲げ角度 76° (端部接触時) に至る状態でも左右対称の変形を保った。試験終了時にお

ける最大ひずみは脇腹 ($\alpha=90^\circ$) に認められた。このような変形挙動は Fig.5(d)に示す PT370³⁾と同様であった。

Fig.5(c)に Fig.5(b)と同程度の曲げ角度 76° における FEM 解析の变形図を示す。FEM 解析と実験で同様の变形を呈した。

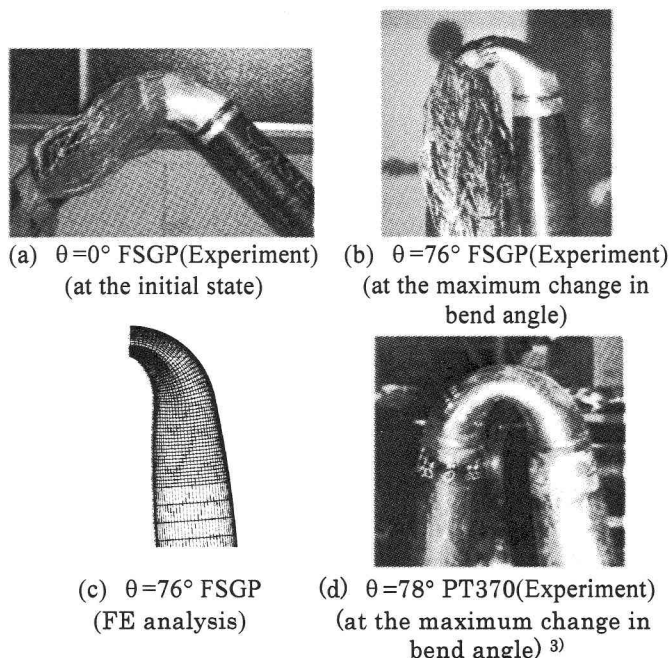


Fig.5 The deformation behavior in the closing mode for FSGP (a)-(c), and for PT370 (d) (Internal pressure =1MPa)

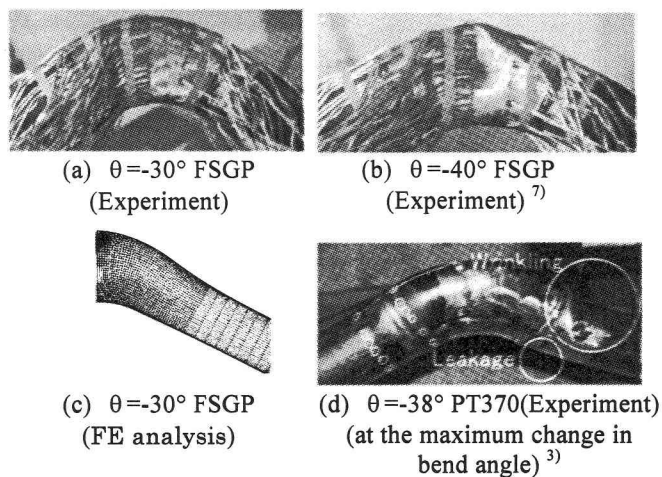


Fig.6 The deformation behavior in the opening mode for FSGP (a)-(c), and for PT370 (d) (Internal pressure =1MPa)

(b) 外曲げ

Fig.6 に変形状況を示す。Fig.6(b)に示すように、変形が進行すると A 断面にてへこみが生じた。

一方、吉崎らは PT370 内圧 1MPa では、ある時点を経にして曲管部の変形が進行せず、直管部に変形が移行し、Fig.6(d)の状況において溶接線近傍の腹側 ($\alpha=180^\circ$) の直管部分にて貫通き裂が発生したと報告している³⁾。これらの 2 つの変形モードが生じた原因については 2.2.5 で考察する。

FSGPは曲管部にて変形が進行したのに対し、PT370は直管部に変形が移行したことから、変形の集中する位置が異なった。さらに、FSGPではPT370よりも大きな曲げ角度まで実験を実施し、漏洩しなかったため、漏洩限界としてはPT370を上回ることが示唆された。

Fig.6(c)に Fig.6(a)と同程度の曲げ角度-30°におけるFEM解析の変形図を示す。FEM解析と実験で同様の変形を呈した。

2.2.2 最大ひずみおよび漏洩の有無について

Table 3 に最大ひずみと漏洩の有無についてまとめる。Table 3 には FSGP の結果に併せて吉崎らが実施した PT370 の結果³⁾を併記した。なお、ここでの最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る。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。式 (1) の L は Fig.2 における初期状態での端部間の距離であり、 δ はジャッキ変位を示す。

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

内曲げについては、外径および内圧に関わらず PT370 と同程度の曲げ角度まで変形を付与しても、全てのケースで漏洩は生じず、また最大ひずみ 20%以上を確認した。一方、外曲げについては、PT370 では全ケースで漏洩が発生したのに対して、FSGP では発生しなかった。そのため内圧の程度に係わらず PT370 よりも大きな曲げ角度まで実験を実施した。

なお、FSGP の内曲げ、外曲げおよび PT370 の内曲げでは曲管部中央断面で変形し、FSGP と同じ溶接条件の PT370 の外曲げでは溶接線近傍とは言え、母材部で漏洩したことから、溶接部は漏洩に影響を及ぼさないと考えられる。

Table 3 Summary of test results

			FSGP	PT370 ³⁾
Closing mode	Internal pressure =0.1MPa	Maximum strain, $\epsilon_{\max}$ (%)	25	25
		Maximum change in bend angle (degree)	76	78
		Presence of leakage	No	No
	Internal pressure =1MPa	Maximum strain, $\epsilon_{\max}$ (%)	20	23
		Maximum change in bend angle (degree)	76	78
		Presence of leakage	No	No
Opening mode	Internal pressure =0.1MPa	Maximum strain, $\epsilon_{\max}$ (%)	64	— *
		Maximum change in bend angle (degree)	-63	-44
		Presence of leakage	No	Yes
	Internal pressure =1MPa	Maximum strain, $\epsilon_{\max}$ (%)	66	— *
		Maximum change in bend angle (degree)	-65	-38
		Presence of leakage	No	Yes

*Maximum strain could not be measured

2.2.3 曲げモーメントおよび最大ひずみについて

内圧 0.1MPa の曲げモーメントと曲げ角度の関係を Fig.7 に、最大ひずみと曲げ角度の関係を Fig.8 に示す。Fig.7 と Fig.8 には PT370 の結果も併記した³⁾。FSGP と PT370 では、曲げモーメントおよび最大ひずみと曲げ角度の関係が概ね同様の傾向を示した。ただし、同じ曲げ角度で比較すると、FSGP は PT370 よりも曲げモーメントが低い値を示した。これは FSGP の強度が PT370 よりも低く、板厚が小さいことに起因していると考えられる。最大ひずみについては、内曲げ、外曲げともに曲げ角度の大きな領域では、FSGP の方が PT370 よりも低い値を示した。

本供試管での曲げ変形性能に関して、FEM 解析の適用限界を確認する目的で解析と実験結果を比較した。内圧 0.1MPa の場合の、曲げ角度と曲げモーメントの関係を Fig.9 に、最大ひずみと曲げ角度の関係を Fig.10 に、それぞれ実験および FEM 解析結果を併記する。解析での最大ひずみは積分点で算出された値の最大値を示す。曲げモーメントについては、内曲げでは 75°、外曲げでは実験において左右対称な変形を示す-30°まで実験と解析に良好な一致が見られる。最大ひずみについても、最大ひずみ 20%を越える領域である、-30°まで良好な一致を示し、さらに発生位置についても実験と解析で良好な一致が見られた。また、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。

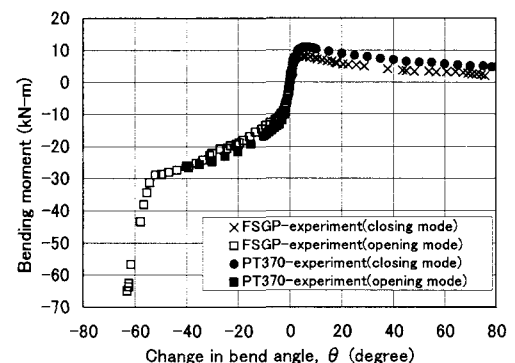


Fig.7 Relationship between bending moment and change in bend angle

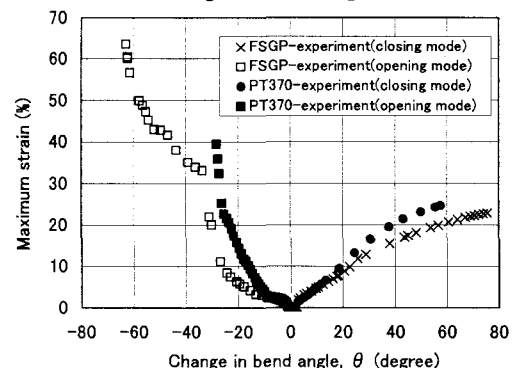


Fig.8 Relationship between maximum strain and change in bend angle

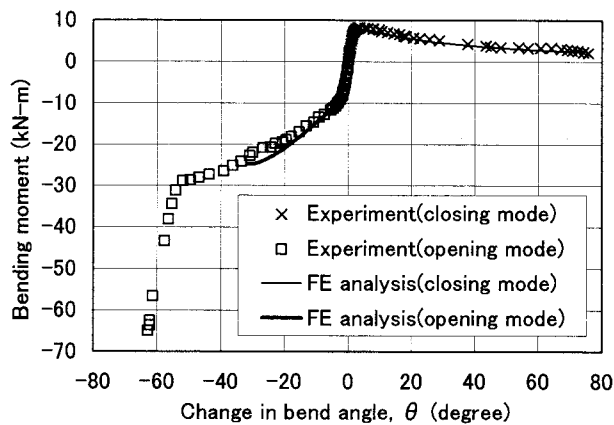


Fig.9 Relationship between bending moment and change in bend angle

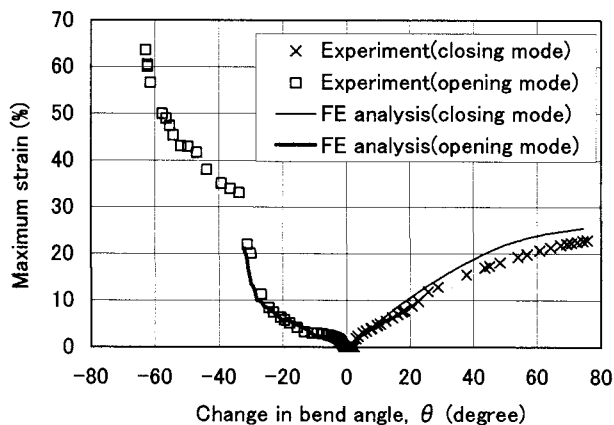


Fig.10 Relationship between maximum strain and change in bend angle

2.2.4 FEM 解析の有効性について

前述の通り、変形挙動、曲げモーメントおよび最大ひずみと曲げ角度が FEM 解析と実験において良好な一致が見られたため、外曲げは -30° 、内曲げは 75° 、さらに最大ひずみは 20%程度までの変形挙動に対する FEM 解析の有効性が確認できた。

2.2.5 外曲げ変形挙動の相違に関する考察

これまでの研究から外曲げの変形としては、曲管と直管の溶接線近傍の直管で変形する場合、また曲管中央断面で変形する場合の 2 通りが挙げられる。このような変形挙動の相違には、内圧、初期断面形状、 D/t が寄与することが明らかにされている^{3),6)}。例えば、細川らの研究⁶⁾では、内圧、真円度が同じであれば変形挙動は D/t に影響を受けるとし、 D/t が大きくなると曲管部が変形すると結論している。

今回の FSGP と PT370 の実験では、内圧 1MPa および内圧 0.1MPa に関して、内圧は同条件であり、初期断面形状はともに顕著な偏平はなくほぼ真円であった。一方、FSGP 100A の D/t は 25 であり、既存の知

見⁶⁾では直管部に変形が集中する範囲であるものの、曲管部に変形が集中した。したがって、本実験結果は従来の知見である内圧、初期断面形状および D/t 以外に外曲げ変形挙動に影響する因子が存在することを示唆している。

(a) 解析手法

今回の FSGP と PT370 の実験では、直管部はともに SGP を用いている。したがって直管部に対する曲管部の強度差および板厚差が外曲げ変形挙動に影響すると考え、これらの因子を Table 4 に示す 5 ケースのように変化させて FEM 解析を実施した。解析対象は Fig.3 に示す 100A 配管とし、シェル要素を用いてモデル化した。なお強度特性は Fig.11 に示すように、降伏応力 (YS) を 174MPa、塑性域の加工硬化を $0.007 \times E$ と仮定したバイリニアモデルを基本とし、曲管部の降伏応力を直管部の 1 倍、または 3 倍と変化させることにより直管部と曲管部の強度差の影響を評価した。

Table 4 Wall thickness and tensile properties for FE-analyses

Case	Straight pipe		Elbow		Deformation behavior
	σ_{y-sp} (MPa)	t_{sp} (mm)	σ_{y-e} (MPa) ($\sigma_{y-e} / \sigma_{y-sp}$)	t_e (mm) (t_e / t_{sp})	
1	174	4.2	522 (3.0)	4.2 (1.0)	A
2			174 (1.0)	4.2 (1.0)	A
3			174 (1.0)	4.6 (1.1)	A
4			174 (1.0)	5.0 (1.2)	B
5			174 (1.0)	5.9 (1.4)	B

A: The maximum strain was observed in the elbow
B: The maximum strain was observed in the straight pipe

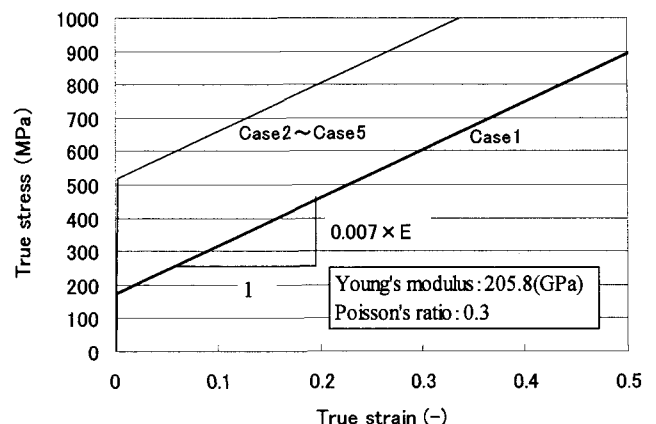


Fig.11 The tensile properties for FE-analyses



(a)Case3 (b)Case5
Fig.12 The deformation shape and the strain distribution
(Change in bend angle $\theta=-19^\circ$)

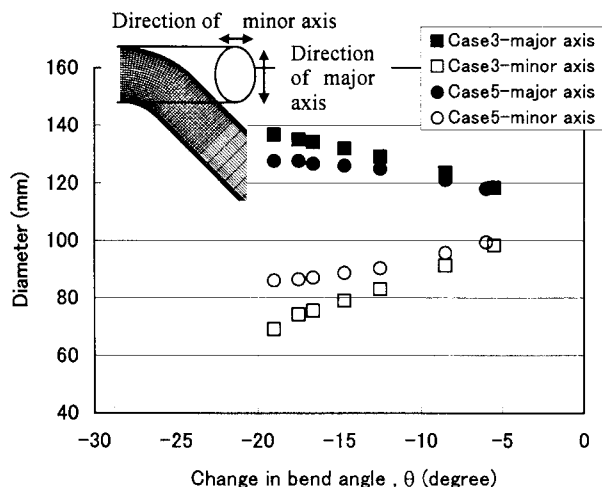


Fig.13 The relationship between change in bend angle and diameter at central cross section of Cases 3 and 5

(b) 解析結果

Table 4 にはひずみ集中部の位置を併記した。ケース 1 およびケース 2 の結果から、曲管部の強度を直管部の 3 倍にした場合と 1 倍にした場合でひずみ集中部は同じ曲管部であった。実際の配管では、直管部に対する曲管部の強度が 3 倍以上とはならないため、変形挙動に影響を及ぼす因子となる可能性は小さい。

一方、曲管部の板厚をケース 2 からケース 5 に示すように、直管部の 1.0 倍、1.1 倍、1.2 倍および 1.4 倍と変化させた場合、ひずみ分布の傾向は大きく分けると 2 種類となった。それぞれ代表的なひずみ分布図を Fig.12 に示す。ここで色の濃い部分は相当ひずみが高く、色の薄い部分は相当ひずみが低いことを示す。Fig.12(a)、Fig.12(b)はそれぞれ曲管部の板厚が直管部の 1.1 倍であるケース 3、1.4 倍であるケース 5 の結果である。Fig.13 にはケース 3 とケース 5 について、曲げ角度と A 断面の長径および短径の関係を示した。曲げ角度約 -15° 以上に変形が進行すると、ケース 3 では線形的に長径および短径が増大し偏平が進行するのに対して、ケース 5 では偏平が進行せず長径および短径が一定値に近づく。したがって、直管部と曲管部の板厚差がない場合には A 断面の偏平が進行するため曲管部のひずみが上昇し、板厚差がある場合には A 断面の偏平が進行しないため曲管部ではなく直管部にひずみの集中部が移行することが確認できた。

以上のことから外曲げの変形挙動に対して、これまでに明らかとなっている、内圧、初期断面形状、 D/t 以外にも、直管部と曲管部の板厚差が影響を及ぼす因子となることが確認された。

なお実験結果では、曲管部が変形した FSGP の板厚は直管部の 1.07 倍 (4.5mm/4.2mm)、直管部にて変形する PT370 の板厚は直管部の 1.29 倍 (5.4mm/4.2mm) であり、本解析結果の妥当性を示している。

3. 地盤変位に対する曲管配管の変形性能

前章に示したように、面内曲げ実験の結果、FSGP の最大曲げモーメントは PT370 よりも低い値を示した。したがって、この差を耐震性の観点から定量的に評価することを目的に、前章で面内曲げ特性に対して有効性が確認できた FEM 解析を用いて、曲管部を有する埋設配管のモデル化を行い、FSGP と PT370 の変形性能について比較検討を行った。

3.1 解析条件

対象とした埋設配管は、面内曲げ実験を実施した外径 114mm とし、Fig.14 に示すような、曲管部を 1 つ有する L 字形の配管とした。吉崎らの研究にて有効性が確認されているシェル要素とはり要素を組み合わせたモデルを用いて、Fig.14 に示す埋設配管モデルを作成した。変形が集中すると予想される部位として、曲管の中心から約 40D の長さはシェル要素を用い、それ以外の直管部ははり要素を用いてモデル化した。FSGP の外径は前章での FEM 解析と同値 114mm を用い、板厚は JIS 規格値である 4.5mm を用いた。また、PT370 の外径は FSGP と同値、板厚は Sch40 の JIS 規格値である 6.0mm とした。材料物性は Fig.4 に示す通りとした。

埋設配管に及ぼす地盤の拘束力は、高圧ガス導管液状化耐震設計指針¹⁰⁾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、Fig.15 に示す特性を有する非線形ばねにてモデル化した。

地盤変位としては、濱田らの知見を参考に¹⁾、Fig.14 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、曲管部に最大変位が生じる内曲げモードと外曲げモードとした。地盤変位は、管に接続された、ばね要素の管との接合点でない側の節点に強制変位として付与した。

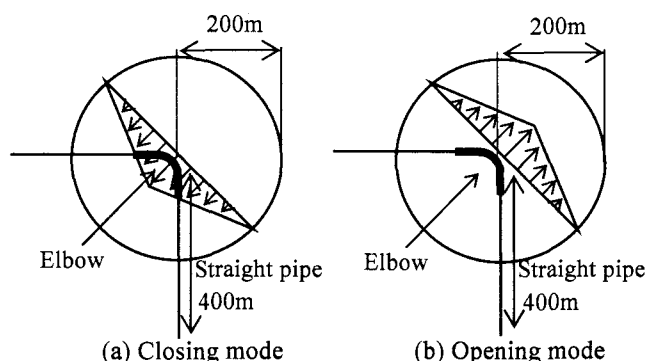


Fig.14 FE analytical model of a buried pipeline with an elbow

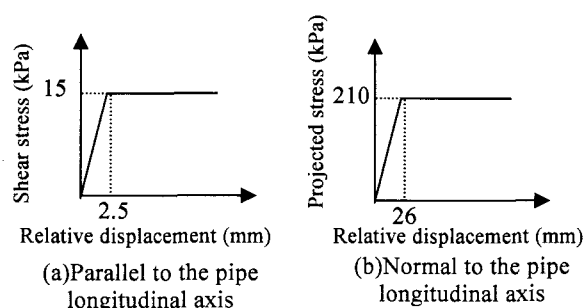


Fig.15 Stress conveyed to pipeline from adjacent ground

3.2 解析結果

Fig.16 に、最大地盤変位量が 3m 時の、FSGP および PT370 の内曲げモードおよび外曲げモードのひずみ分布図を示す。なお、高圧ガス導管液状化耐震設計指針では、設計に用いる地盤の水平変位を最大 3m としている。図の変形倍率は 1 倍であり、色が濃いほど大きなひずみが生じていることを表している。FSGP と PT370 の内曲げモードおよび FSGP の外曲げモードでは曲管部中央断面で、PT370 の外曲げモードでは曲管部との溶接線近傍の直管部で変形が集中し、2.2.1 で示した変形挙動とそれぞれ同様の傾向を示した。

Fig.17 に、地盤変位量と最大発生ひずみの関係を示す。これらの結果より、FSGP および PT370 とともに本解析範囲である地盤変位量 5m の領域まで、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大きいひずみが発生していることが分かる。また、地盤変位量 3m 時の最大ひずみは、内曲げモードでは FSGP および PT370 でともに 10% であり、外曲げモードでは FSGP で 6%、PT370 で 7% を示した。2 章で示した実験結果より、FSGP は、PT370 と同様に 10% までのひずみレベルでは、漏洩に至ることはないため、一方向の地盤変位に対して PT370 と同程度の耐震性を有することを確認した。

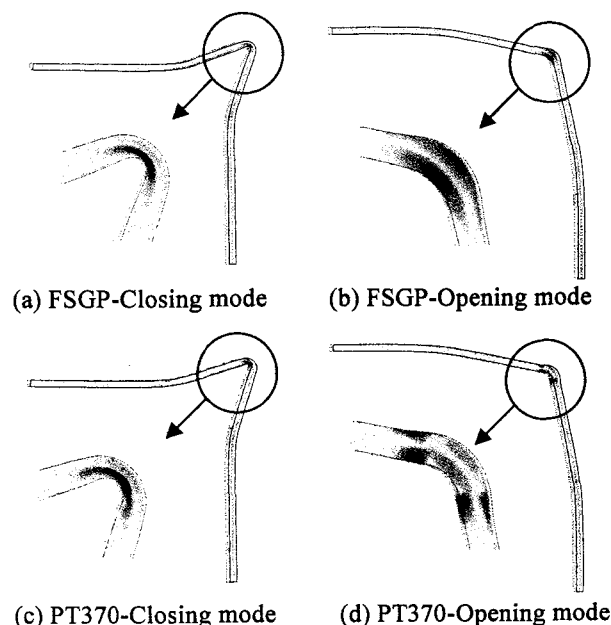


Fig.16 The deformation and the strain distribution (Ground displacement = 3m)

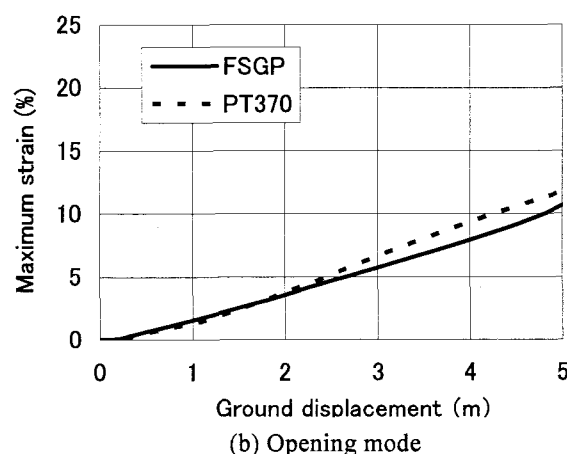
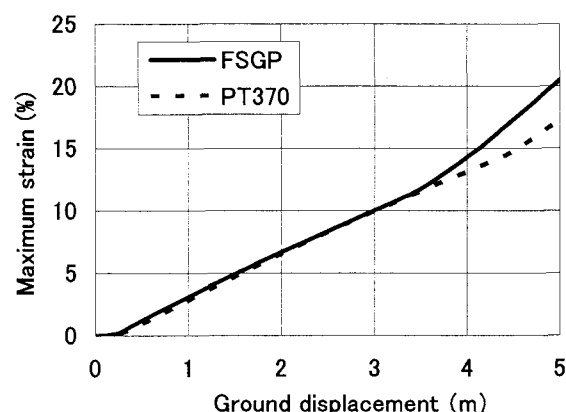


Fig.17 Relationship between maximum strain and ground displacement

4. 結 言

小口径ガス導管用配管を対象として、外径 114mm (D/t=25) 中心角 90° の FSGP (JIS B2311) ロングエルボに対し、中圧導管の使用圧力相当の内圧を付与して面内曲げ実験および FEM 解析を実施した。さらに、その知見を反映し、同部を有する配管系を対象に、埋設環境を考慮した耐震性評価を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) FSGP を用いた面内曲げ実験を実施した結果、内曲げでは PT370 と同程度の変形角度、外曲げでは PT370 を上回る変形角度において漏洩が発生しないことを確認した。
- (2) FSGP の面内曲げに対して、最大ひずみ 20%程度の領域までの変形挙動に対するシェル要素を用いた FEM 解析の有効性を確認した。
- (3) 曲管の外曲げの変形挙動に寄与する因子として、直管部と曲管部の板厚差が挙げられることを確認した。
- (4) 相対的に強度が低く、かつ板厚が小さい FSGP は、一方向の地盤変位に対して PT370 と同程度の耐震性を有することを確認した。

謝 辞

実験の実施には東京理学検査(株)六谷英樹氏、FEM 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)の萩原直人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) 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本利克: 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集 No.736/III-6, pp.211-220, 1986
- 2) 日本ガス協会: 日本海中部地震と都市ガス, 1984
- 3) 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
- 4) Yoshizaki, K., O'Rourke T. D. and Hamada, M., Large deformation behavior of buried pipelines with low-angle elbows subjected to permanent ground deformation, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, Vol. 18, No. 1, No. 675/ I-55, pp.41-52, 2001
- 5) Yoshizaki, K., D. O'Rourke T. and Hamada, M., Large scale experiments of buried steel pipelines with elbows subjected to permanent ground deformation, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, Vol. 20, No. 1, No. 724/ I-62, pp.1-11, 2003
- 6) 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変形特性: 構造工学論文集, vol.46A, pp.17-24, 2000
- 7) 橋本義和, 福田直樹, 谷田部洋: 曲管部と直管部に強度と板厚差を有する小口径パイプラインの変形挙動に関する研究, M&M2003 材料力学部門講演論文集, pp.781-782, 2003
- 8) 橋本義和, 谷田部洋, 福田直樹, 吉崎浩司: 小口径パイプラインの変形挙動に及ぼす曲管と直管の強度および板厚差の影響, 溶接構造シンポジウム 2004 講演論文集, 2004
- 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) 日本ガス協会: 高圧ガス導管液状化耐震設計指針, 2001

(2005 年 1 月 17 日 受付)