

埋設パイプライン曲管部の低サイクル疲労強度

LOW CYCLE FATIGUE STRENGTH OF WELDED ELBOWS SUBJECT TO IN-PLANE BENDING

鈴木 信久* 大場 修幸*

By Nobuhisa SUZUKI and Shuukoh OHBA

Nonlinear bending deformation and low cycle fatigue strength of butt-welded elbows are presented. Bending tests were run on 6-, 12- and 24-in. outside diameter welded elbows with bend radii 1.5 times larger than the outside diameter. Low cycle fatigue tests were also carried out using the 6- and 12-in. elbows. A 6-in. elbow was buried in a test compartment for the low cycle fatigue test in which sandy soil was compacted.

The low cycle fatigue strength of the butt-welded elbows, the number of cycles of deformation, is represented with respect to bending angle of the elbows.

1 緒 言

本論文は、埋設パイプラインベンド部の耐震安全性を確認する目的で、溶接エルボの低サイクル疲労特性を実験的に検討したものである。

地震動によって発生する地盤の繰返し変形、および地盤の液化化に伴う非可逆的な地盤の大変位に対する埋設パイプラインの耐震安全性評価^{1,2)}にとって、管体の強度特性は重要なパラメータであることは言うまでもない。溶接パイプラインの場合、前者では鋼管の塑性域における低サイクル疲労特性、後者では塑性域における大変形特性が必要になる。パイプラインの大半を構成する直管のこれら強度特性についてはかなりの研究成果が蓄積されている一方^{3~5)}、溶接エルボの塑性域変形特性に関する研究は比較的少なく^{6~9)}、埋設状態での低サイクル疲労特性に関する実験データは見当たらないようである。

本論文では、ベンドの低サイクル疲労特性を実験的に検討し、埋設パイプラインベンド部の安全性評価に有用な基礎データを得ることを目的としている。したがって実験ではまず、エルボの塑性変形特性を調べ、次に空中および埋設状態における低サイクル疲労特性を調べた。そして埋設パイプラインの耐震設計に利用し易いように、エルボの低サイクル疲労寿命(き裂貫通までの繰返し回数 N)をエルボの回転率 ω の関数で表している。

* NKK 応用技術研究所 川崎第一研究部 (〒210 川崎市川崎区南渡田 1-1)

2 エルボの面内曲げ変形特性

2.1 実験概要

良く知られているように、ベンドが曲げモーメントを受けると、通常の曲がり梁の理論や真直梁の理論によって計算される値よりもはるかに大きく変形し、局部的に発生するひずみも大きくなる。この傾向はベンドの半径が小さいほど、また薄肉であるほど著しい⁹⁾。

ここでは、エルボのこのような変形特性を把握するため、150A(外径165.4mm,管厚5.0mm,材質SGP)、300A(318.5,6.9,STPT38)、600A(609.6,9.5,STPY41) ロングエルボ(エルボの曲げ半径が管径の約1.5倍)(以下単にエルボと呼ぶ)各1体を対象に、塑性域における面内内曲げ変形特性について検討する。図1に150Aエルボを例にとって面内曲げ試験用供試体および実験方法を示し、表1に供試体寸法および材料特性を示す。

2.2 エルボの面内曲げ変形特性

150A,300A,600Aエルボの面内内曲げ試験で得られた荷重(P)とアクチュエータの変位量(δ)の関係を図2に示す。また、このような変形は有限要素解析によって比較的精度良く推定できるため、参考までに解析結果を合わせて示す。

エルボが内曲げ変形を受けると断面が偏平化し、管側の周方向に板曲げ変形による大きなひずみが発生する。このひずみは、エルボの曲げ変形が進み、管材料の塑性化が進むにつれて大きくなる。一方、エルボが外曲げ変形を受けると断面は長円化し、変形の初期段階では管側の周方向曲げひずみが卓越するが、変形が進むにつれて管頂および管底の軸方向ひずみが卓越するようになる。

このような非線形領域における変形特性を有限要素解析で求めた。有限要素法解析では、図1の面内曲げ試験体を図3のように4節点シェル要素でモデル化し、管材料の応力～ひずみ線図は試験片の引張試験結果を参照して図4のように仮定した。図3の解析モデルは幾何学的対称性を考慮して試験体の1/4としたものである。図1の試験治具(フランジおよびピン結合部)の部分はモデル化が複雑なため直管部と同じパターンで要素分割し、直管部と比較して十分大きな剛性を持たせた。

図5に解析結果を示す。図の第一象限は内曲げ変形時の曲げモーメント(M)とピークひずみ(ϵ_{max})で、第三象限は外曲げ変形時の曲げモーメントを表している。ただし、ピークひずみは絶対値で表しているため、第一および第二象限に表示してある。原子力発電所の配管を対象にした ASME sec. III Div.1

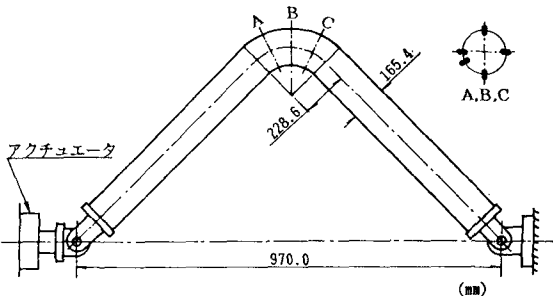


図1 150Aロングエルボの面内曲げ試験概要

表1 供試体寸法および材料特性

呼び径	管径	管厚	曲げ半径	ピン間	材料	降伏応力
150A	164.5	4.9	228.6	970.0	SGP	25.0
300A	318.5	6.9	457.2	1100.0	STPT38	29.5
600A	609.6	9.5	914.1	2300.0	STPY41	23.0
単位	mm					kgf/mm ²

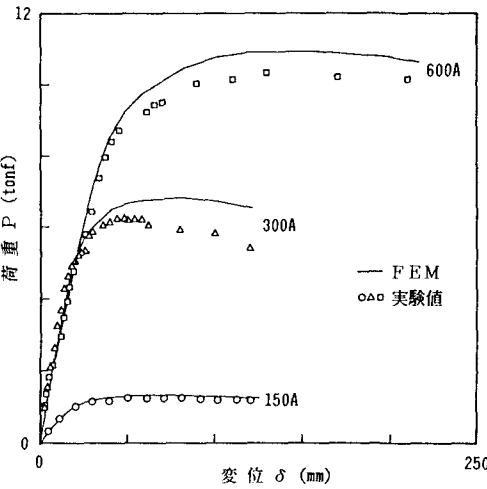


図2 エルボの面内曲げ試験におけるP～ δ 曲線

Subsection NB¹⁰⁾ (以降ASME/NBと言う)では、エルボの線形領域における変形特性のうち回転率 ω およびピークひずみ $\varepsilon_{\max}$ を次式で与えている。

$$\omega = \frac{\Delta \phi}{\phi} = K \frac{R}{EI} M \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\max} = C \frac{r}{EI} M \quad (2)$$

ここに、 $\Delta \phi$:エルボ両端の相対角変位、 ϕ :エルボの曲がり角度、 ω :回転率、 K :撓み係数($=1.65/\lambda$)、 C :応力増加係数($=1.93/\lambda^{2/3}$)、 λ :パイプ係数($=Rt/r^2$)、 R :曲げ半径、 r :半径、 EI :曲げ剛性、 M :曲げモーメントである。また、曲率が単位長さ当りの弧の角変化量を表しているのに対し、回転率 ω は、ベンドの曲がり角度に対する曲げ角度の比を表しており、初期曲率に対する曲率変化の比に等しい。撓み係数 K は、エルボが薄肉であるために生ずる断面の扁平化により、回転率が増加する割合を表している。

上式は配管系の設計基準に基礎理論として良く用いられているKarmanの式⁹⁾である。線形領域において(1)および(2)式と図5の有限要素解の比較を表2に示す。この比較表から分かるように、上式と有限要素解は非常に良く一致している。

ここでは、図5に示したエルボの塑性域における変形特性を定量的に表現し、後述の梁モデルによる有限要素解析に適用するため、(1)および(2)式を次のように増分形式に書き換えておく。

$$\Delta \omega = f(\omega/\omega_y) K \frac{R}{EI} \Delta M \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon_{\max} = g(\omega/\omega_y) C \frac{r}{EI} \Delta M \quad (4)$$

ここに、 $f(\omega/\omega_y)$ 、 $g(\omega/\omega_y)$ はそれぞれ撓み係数および応力増加係数の塑性域における修正係数である。有限要素解を参考にしてピークひずみが3～4%程度までを三直線近似すると、それぞれ表3のように表される。ただし、表3の ω_y は次式で与えられる。

$$\omega_y = \frac{R}{2r} \frac{1.71}{\lambda^{1/3}} \varepsilon_y \quad (5)$$

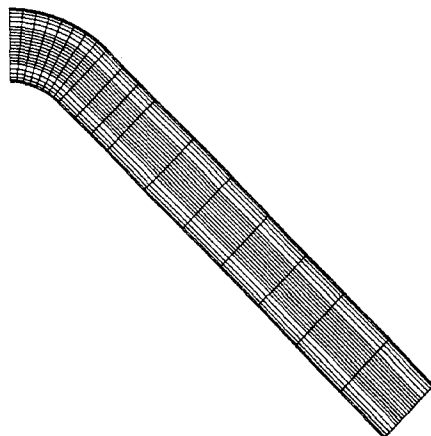


図3 解析モデル

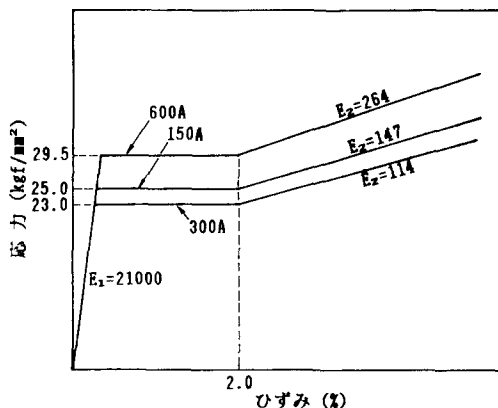


図4 鋼材の応力～ひずみ線図

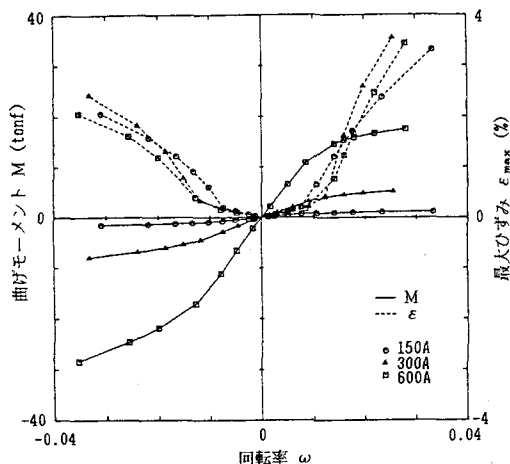


図5 エルボの曲げ変形特性

さらに、 ω_c は有限要素解析で得られた $\varepsilon \sim \omega$ 曲線が非線形域に入るところを表している。表3のように $1 < \omega_c / \omega_y$ になっているのは、最大ひずみが降伏ひずみ ε_y に達した後も $\varepsilon \sim \omega$ の関係は線形性を保つことを示している。さらに $\omega = 2 \omega_c$ は三直線近似の第二折点を表している。

表2 ASME sec.Ⅲ(NB)と有限要素解の比較

呼び径	ASME/NB		FEM(内曲げ/外曲げ)		Karman(3次)	
	$K=1.65/\lambda$	$C=1.93/\lambda^{2/3}$	K	C	K	C
150A	9.38	6.14	8.67/8.01	6.28/5.58	8.97	5.05
300A	12.7	7.52	12.6/10.8	7.84/6.60	12.1	6.25
600A	17.1	9.18	18.6/15.1	10.5/8.39	16.3	7.62

表3 塑性域におけるエルボのK, Cの修正係数

	呼び径	ω / ω_c		$\omega_c < \omega < 2 \omega_c$		$2 \omega_c < \omega$		ω_c / ω_y
		内曲げ	外曲げ	内曲げ	外曲げ	内曲げ	外曲げ	
K	150A	1.10	1.15	0.445	0.684	0.109	0.212	1.44
	300A	1.07	1.18	0.246	0.590	0.784	0.267	1.69
	600A	0.942	1.20	0.248	0.445	0.114	0.307	1.87
C	150A	1.03	0.934	5.51	4.82	3.83	1.73	1.44
	300A	0.921	0.887	11.9	6.28	1.97	1.58	1.69
	600A	0.923	0.923	10.9	5.24	6.20	1.69	1.87

3 エルボの低サイクル疲労特性

3.1 実験概要

エルボの低サイクル疲労特性を調べるため、前項に示したような空中における実験と試験土槽に埋設した状態での実験を行った。ここではそれらを区別するため、前者を空中疲労実験、後者を埋設疲労実験と呼ぶこととする。空中疲労実験では、150Aおよび300Aエルボを対象として、エルボに疲労き裂が貫通するまで繰返し面内曲げ変形を与えた。実験方法は変位制御方式で、図1と同様な実験装置を使用した。変形は内曲げから開始し、1, 2サイクル目では有限要素解で得られたピークひずみの発生位置(図1参照)に貼付したひずみゲージに着目し、所定のひずみ振幅に近い値が得られることを確認し、3サイクル目からの実験を継続した。埋設疲労実験では、エルボの変形特性を埋設状態で確認し、地盤との相互作用を合わせて検討する目的で、鋼製試験土槽に150Aエルボを含む90°曲がり配管を埋設して繰返し変形を与えた。地盤の締めめ度は $N_{c30}=14$ (土研式簡易貫入試験)であった。実験方法は空中疲労実験と同様に変位制御方式とし、変位振幅は5 cmとした。この変位振幅5 cmは、後述のFEMの解析結果を参照して、エルボの最大ひずみ振幅が2~3%の範囲に設定できること及び地盤ばねが非線形領域で変形することを考え併せて設定した値である。また、これによってき裂発生までの変位繰返し回数が100~250回(図18最適疲労曲線参照)となることから、実験期間が比較的短期間で済むことになる。図6に埋設実験装置および供試体の概要を示す。また、エルボに貼付したひずみゲージの位置は空中疲労実験と同様である。

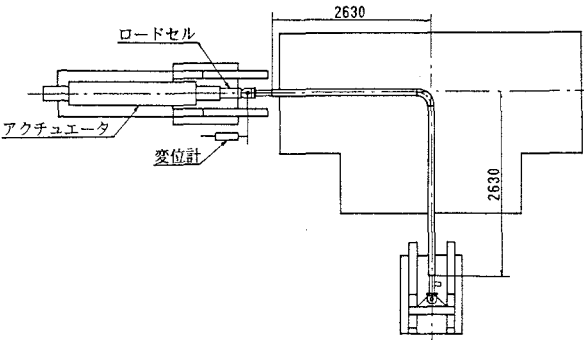


図6 埋設実験装置および供試体の概要

3.2 空中疲労実験

表4に最大ひずみとき裂貫通回数の一覧、図7にき裂の発生状況の一例、図8には150Aエルボの繰返し変形過程における $M \sim \omega$ 履歴曲線の例を示す。各空中疲労供試体のき裂はエルボの対称軸を中心に分布したが、対称軸から最大ずれは図7程度であった。また、図9には150Aエルボのピークひずみ発生点近傍における周方向ひずみの変化を繰返し回数を横軸にとって示す。さらに、図9と同一地点のひずみ変化を横軸に強制変位量をとって図10に示す。

表4 き裂発生回数までの繰返し回数

呼び径	ひずみ振幅	き裂貫通回数
150A	1.1	550
150A	1.9	99
150A	2.6	50
150A	2.7	29
300A	1.5	310
単位	%	

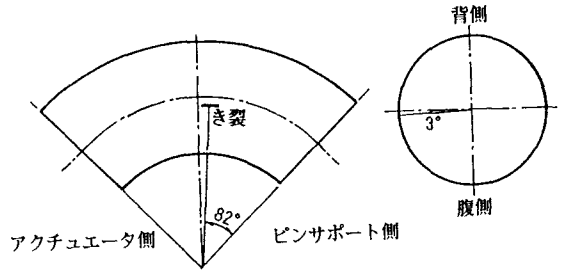


図7 エルボのき裂貫通位置

図8の $M \sim \omega$ 履歴曲線は、変位振幅 $\delta_a = 83\text{mm}$ 、116mmのもので、横軸(+)が内曲げ変形、(-)が外曲げ変形を表している。また、同図中破線は図5の $M \sim \omega$ 曲線で、内曲げおよび外曲げ変形を各々独立に計算したものである。繰返し変形時における内曲げ変形の $M \sim \omega$ 曲線は、断面の扁平化に伴って曲げ剛性が低下するが、最大荷重は変位振幅の差によらずほぼ一定になっている。これに対し外曲げ変形では、扁平化した断面が回復しながら変形が進むため、 $M \sim \omega$ 曲線は有限要素解の $M \sim \omega$ 曲線に接するように変化している。

図9に見られるように、エルボのピークひずみは変位の繰返し回数の増加に伴って変化する。変位量を設定した段階でのひずみと比較すると、平均ひずみは徐々に変化しているが、ひずみ振幅は5サイクル目以降はほぼ安定している。5サイクル目以降ひずみ振幅が安定する様子が図10にも表れている。この様なひずみ変化は300Aエルボにも共通した現象であり、変位制御方式による疲労実験の特徴である。

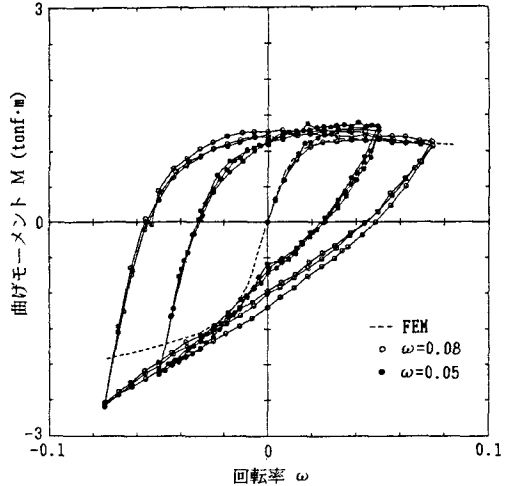


図8 繰返し変形過程における $M \sim \omega$ 曲線

3.3 埋設疲労実験

変位振幅5cmで繰返し変形を与えたところ、ひずみ振幅2.5%、き裂貫通回数63回であった。

図11に示す繰返し変形過程における荷重(P)～変位(δ)履歴曲線を見ると、1サイクル目で最大荷重が発生し、2サイクル目以降は荷重が低下している状況がよく分かる。これは、管周辺の地盤ばねが劣化しているためである。

図12には、1サイクル目の $P \sim \delta$ 曲線について、実験装置全体をビーム要素、地盤ばね要素でモデル化した有限要素解析結果と比較して示す。ただし、地盤のばね特性は、別途行った短管の埋設実験で得られた結果を図13のようにモデル化したものである。また、エルボは軸方向に5分割し、直管はエルボ両側50cmを5cm長さに要素分割し、残りを10cm長さに

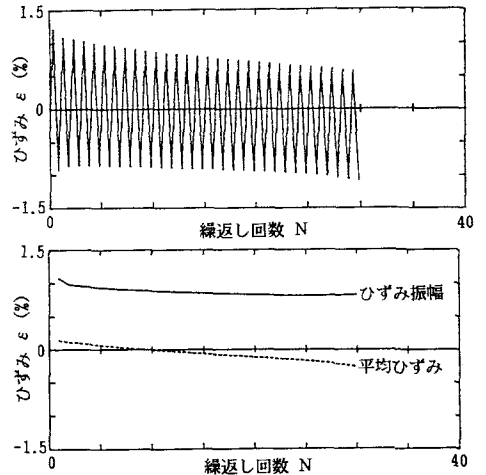


図9 繰返し変形過程におけるひずみの変動例

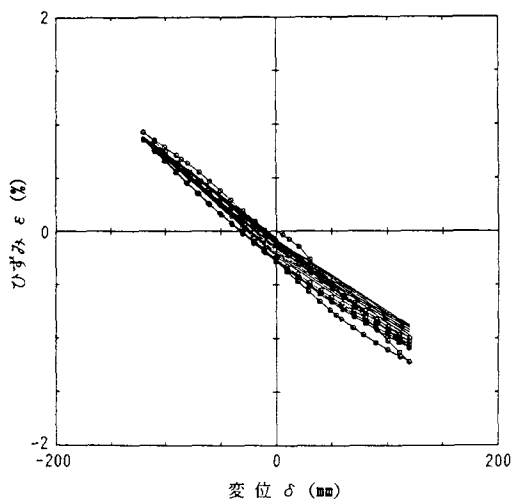


図10 入力変位とひずみの変動状況

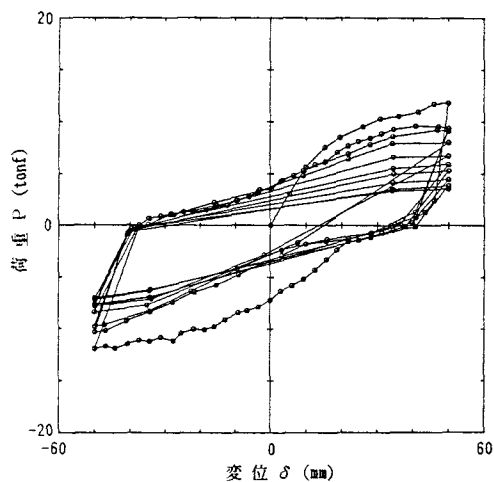


図11 P～δ履歴曲線

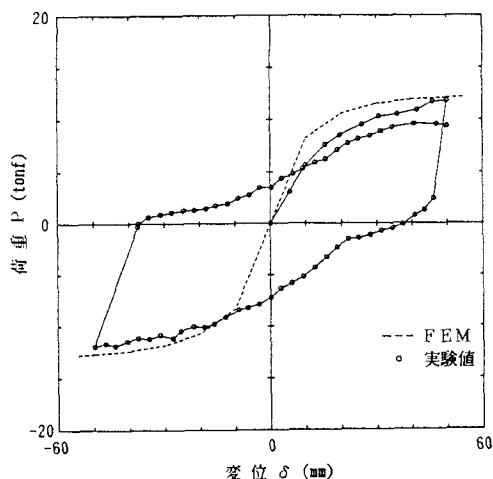


図12 P～δカーブの比較

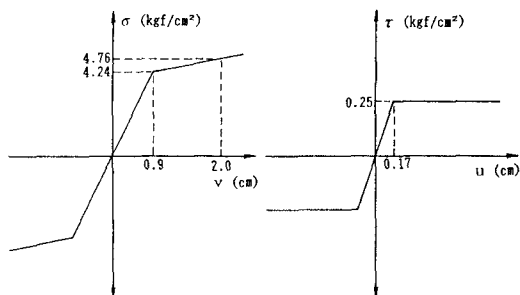


図13 地盤ばね特性のモデル化

分割した。エルボの曲げ変形特性は表3のデータを用いて表した。図12を見ると、解析値と実験値は良好に一致しているのが分かる。また参考までに、変位量が $\pm 50\text{mm}$ における解析結果のうち変形図を図14に示す。

前述のように、本実験ではき裂貫通線返し回数63回、ひずみゲージ測定値でピークひずみはエルボ中央断面周方向に2.5%であった。このひずみゲージは5サイクル目で断線したために全変形過程におけるひずみ変化をフォローできないが、参考として3サイクル目までのひずみの変化を図15に示す。

き裂貫通位置は図16のように、エルボのアクチュエータ側端部付近に発生しており、図7に示した低サイクル疲労実験時のき裂貫通位置とは異なっている。ただし、き裂の形状および中立軸からの距離はほぼ同様であった。

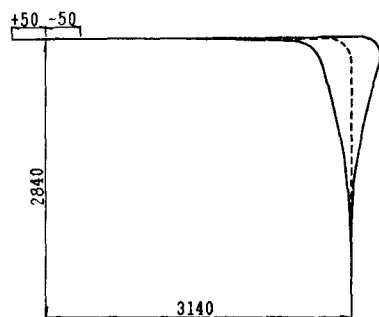


図14 埋設疲労実験における変形図

き裂の発生位置がエルボ端部寄りに発生したことを説明するために、有限要素解析で得られた回転率 ω のエルボに沿った分布を図17に示す。図17の上部が内曲げ変形、下部が外曲げ変形に対応している。また、横軸の α はエルボの断面位置をアクチュエータ側の端部(エルボの左端)を原点として表したものである。図中、実線がエルボを5分割した各要素の回転率、破線がエルボ両端の相対回転角から求めた平均回転率である。図のように、最大回転率は内曲げおよび外曲げ変形ともにエルボの左端寄りに発生しており、埋設疲労実験でき裂の貫通位置がずれたことと一致している。この図から、平均回転率はエルボ中央断面の回転率とほぼ等しくなっているのが分かる。一方、空中疲労実験では、エルボにはほぼ純曲げに近い状況であるが、エルボ対称軸に最大曲げモーメントが発生している。この点が埋設疲労実験時における挙動の相違点である。

4 エルボの低サイクル疲労強度

4.1 疲労強度とピークひずみの関係

空中疲労実験および埋設疲労実験の結果を合わせて図18に示す。図中、○, □はそれぞれ150A, 300Aの空中疲労実験結果(表4参照)で、●は150A埋設疲労実験の $\varepsilon_a = 2.5\%$, $N = 63$ 回を表している。また、図にはASME/NBの最適疲労曲線および設計疲労曲線を比較のために示す。

この最適疲労曲線は、小型試験片を用いた完全両振りひずみ制御の低サイクル疲労試験から得られた多数のデータの50%破壊確率 $\varepsilon \sim N$ 線図である。設計疲労曲線は、最適疲労曲線のひずみ振幅(時間強度)に関しては1/2、破壊寿命に関しては1/20の安全率を取って、安全側に書き直したものである。しかし、設計疲労線図から任意の寿命 N に対する許容値 ε_a を一々読み取るのは複雑な作業となる。 $10 < N < 10^4$ の範囲で、最大耐力が55.0kgf/mm²以下の炭素鋼、低合金鋼、高張力鋼に対しては、Stromeyerの提案した次式で比較的良好な近似で設計疲労曲線が表される¹¹⁾。

$$\varepsilon_a = C_1(N)^{-p} + \varepsilon_0 \quad (\%) \quad (6)$$

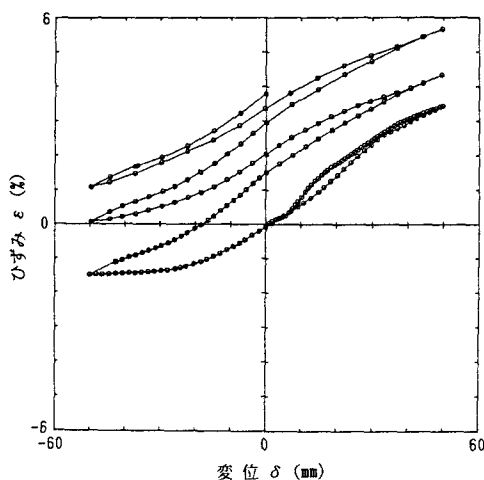


図15 埋設疲労実験における
周方向ひずみの変化

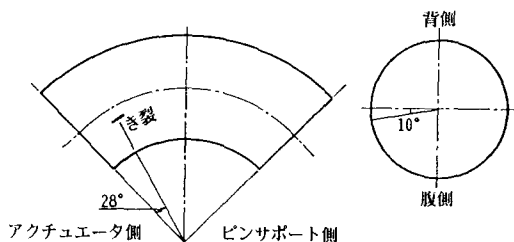


図16 エルボのき裂貫通位置

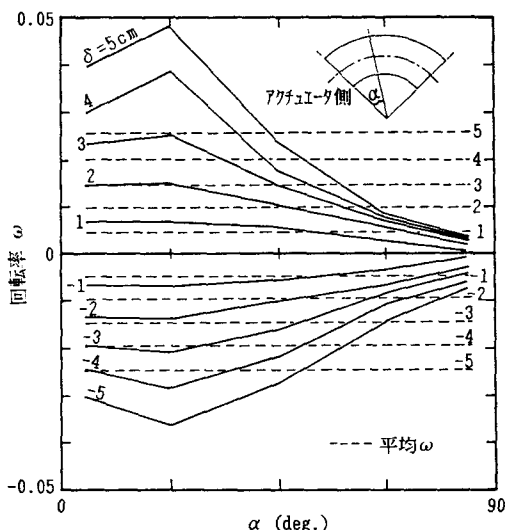


図17 エルボに沿った回転率の変化

ここに、 $C_1=4.73$ 、 $p=0.426$ 、 $\varepsilon_0=0.0387$ である。この式で計算された値と設計疲労線図から読み取った値の誤差は、ひずみ振幅 ε_a で $\pm 5\%$ 、疲労強度 N で $\pm 20\%$ 程度であり、実用的な近似式である。

図のように、実験データを両対数軸上で線形回帰すると、次式が得られる。

$$\varepsilon_a = 8.38 N^{-0.312} (\%) \quad (7)$$

また、150A埋設疲労実験のひずみ測定点が図16に示すように、き裂発生位置とは離れたところにあるため、ピークひずみがつかめていない。これは、図17に示すように、エルボの曲げモーメントがエルボの弧に沿って変化していることから説明できる。そこで、き裂発生位置における回転率の差を図17から求め、図5によりピークひずみ ε_a' を推定したところ、 $\varepsilon_a' = 3.2\%$ であった。これを図18に▲で示す。このように、エルボの最大ひずみを精度良く測定できれば、実測値は最適疲労曲線にかなり近い位置にプロットされることになる。

一般に、実測値は必ずしも最大ひずみを表していない可能性がある。たとえば、図19のエルボの塑性域における周方向ひずみの実測値と有限要素解析結果の比較に見られるように、ひずみはかなり狭い範囲で大きく変化しており、ひずみゲージの貼付位置が少しずれることによって、ピークひずみが測定できなくなることは明白である。このような場合、当然のことながら、実測値は図18の最適疲労曲線のかかなり下側にプロットされるが、最悪の場合には設計疲労曲線を下回ることさえ考えられる。すなわち、ピークひずみを設計時に適切に評価できない場合には、エルボの疲労強度を過大に見積ることになり、極めて危険な結果を招く可能性がある。このように不確実な評価は、設計者の立場から考えると極めて不都合であり、本来ならばなるべく通常の設計方式に従って安全性を評価するのが望ましい。

塑性域で変形するエルボのピークひずみを精度良く推定するのは、少々煩雑であるが有限要素法のような詳細な解析手法によらざるを得ない。そこで本論文では、有限要素法によるピークひずみの高精度な推定を避け、前述のKarmanの式でピークひずみと回転率の関係を近似的に表し、さらに ASME/NBの設計疲労曲線を近似するStoromeyerの式を用いて、エルボの疲労強度を回転率の関数として表す方法を提案する。この方法を次項に示す。

4.2 エルボの回転率 ω と疲労寿命 N の関係

さて、(2)式に(1)式を代入すると、エルボの最大ひずみ $\varepsilon_{\max}$ は次式のように表される。

$$\varepsilon_{\max} = \frac{Cr}{KR} \omega \quad (8)$$

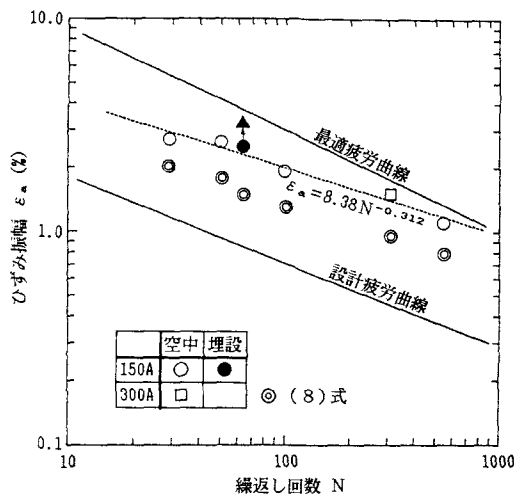


図18 低サイクルおよび埋設疲労実験の結果

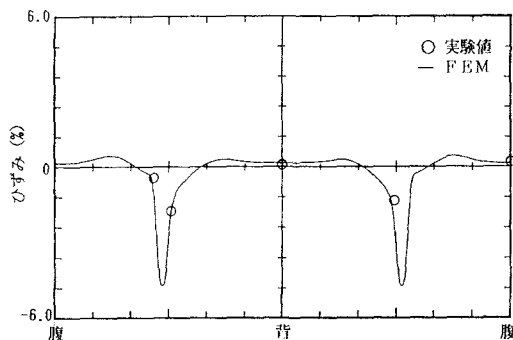


図19 150Aエルボの塑性域における周方向ひずみ分布

一方、設計疲労曲線は(6)式で表されるから、(6)式の ε_a と(8)式の ε_{max} を等置すると、

$$C_1(N)^{-p} + \varepsilon_o = \frac{C R}{K R} \omega \quad (9)$$

となり、これを ω について表し、 C, K をASME/NBで表すと、

$$\omega = \frac{0.855}{\lambda^{1/3}} \frac{R}{r} (4.73 N^{-0.426} + 0.0387) \quad (10)$$

となる。したがって、(10)式を使えば設計疲労曲線上で ω と N の関係が与えられる。

また、図18の◎は各実験データについて、エルボの両端に装着した高精度傾斜計による回転角 $\Delta\phi$ から求めた回転率 ω を(8)式に代入して、 $\varepsilon_a (= \varepsilon_{max})$ を求めたもので、ひずみ振幅が2%程度のところでも、(10)式の結果は明らかに設計疲労曲線の上に位置し、安全側の評価であることが分かる。

ただし、ここで一つ注意しなければならないのは、(10)式はエルボの塑性変形域における回転率(ω)と疲労強度(N)の関係を近似的に表す式であり、エルボを含むパイプラインの変形解析では、外力(F)または地盤変位量(δ)とエルボの変形量(ω)の関係は表3のように非線形になることである。したがって、(10)式に代入すべき ω は、有限要素解析等で求めなければならない。

5 結 言

本論文では、90°ロングエルボの塑性域における変形特性、および低サイクル疲労特性について実験的な検討を進め、エルボの回転率(ω)とき裂貫通寿命(N)の関係を簡単に表した。エルボの曲げ変形量を回転率で表しているため、当然のことであるが、90°以外のエルボについても、曲げ変形が卓越している場合にはこの関係が適用可能である。

エルボのフレキシビリティは、埋設パイプラインの耐震性向上対策に重要な役割を果たすことは良く知られていることであり、耐震設計指針³⁾でも、その性能を有効に活用するように設計手法が考慮されている。しかし最近、液状化に起因する地盤変状と埋設構造物の地震被害に関する研究も盛んに進められており、従来の耐震設計では考慮されていない地盤の変位パターンも考慮して分析が進められている。本研究の成果はこのような新しい入力変位についても効率良く対応できるものである。

なお本研究は、日米共同研究「地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究」(委員長:久保慶三郎 東京大学名誉教授、事務局:(財)地震予知総合研究振興会)の一環として行ったものである。また、東海大学浜田政則教授、建設省土木研究所川島一彦研究室長には貴重なご助言をいただきました。ここに末筆ながら付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1 佐武正雄,西尾宣明,佐藤紘志 編: 地中埋設管の液状化による被害の実体とその対策, 日本科学技術協会, 449p.,1988.
- 2 鈴木信久: '埋設管の地震被害と信頼性', 第3回確率論的安全性評価(PSA)に関する国内シンポジウム論文集,(財)エネルギー総合工学研究所,p.96~104.,1988.
- 3 (社)日本ガス協会: ガス導管耐震設計指針,1983.

- 4 鈴木信久,大場修幸 : '繰返し軸方向変位に対する埋設鋼管の非弾性座屈強度', 構造工学論文集,Vol.35A, p.1351~1358,1988.
- 5 Suzuki,N., Arata,O. and Suzuki,I. : 'Parametric Study on Deformation Analysis of Welded Pipeline Subject to Liquefaction-Induced Permanent Ground Displacement', Proc. of 1st Japan-U.S. Workshop on Liquefaction,ADEP,p.155~162,1988.
- 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,p.865~878,1986.
- 7 平瀬欣弘,北尾幸市,川原正言,鈴木勇武 : 'エルボの面内曲げ疲労特性', 圧力技術, Vol.24,No.5, p.19~26, 1986.
- 8 Suzuki,N. and Nasu,M. : 'Nonlinear Analysis of Welded Elbows Subject to In-plane Bending', Computers & Structures,Vol.32,No.3/4,Pergamon Press,p.871~881,1989.
- 9 鶴戸口英善,中桐 滋,加納 巖 : '薄肉彎曲管の応力と変形について', 高圧力,日本高圧力協会,Vol.6,No.3, p.34~42,1968.
- 10 "ASME SECTION III DIVISION I - SUBSECTION NB - 3653.2, SI-13.
- 11 金澤 武,飯田國廣 : 溶接継手の強度,溶接全書17,産報出版,252p.,1979.

(1989年10月2日受付)