

埋設管路曲管部の大変形挙動に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE LARGE DEFORMATION BEHAVIOR
OF THE PIPE-BEND OF BURIED PIPELINE

大内 元※

佐藤紘志※※

By Hajime OHUCHI and Hiroshi SATO

In this paper, the experimental results of statical and low-cycle fatigue tests for the 90° long-elbow (SGP 100A) are mainly described. Eight specimens were tested under various loading patterns to clarify the large deformation behavior and the limit of collapse of the pipe-bend.

As a result of this experimental study, an allowable deformation of the pipe-bend is estimated by taking account of the number of cyclic loading to the collapse and the maximum strain. The relationship between this value and the historical absorbed energy is also discussed.

1. 緒 言

埋設管路は、地表面に近い表層地盤内に細長く敷設された線状構造物であり、特に大断面のもの以外はその質量効果が無視できるので、一般の地上構造物と異なり、地震時には地盤の変位に追随した挙動を示すと考えられている。従って、地震時に地盤の液化化などによって大きな地盤変位が生ずると、鋼管といえども折損などの被害を受けることがある¹⁾。このような埋設管路に対する最近の耐震設計指針²⁾では、耐震性の評価の基準が許容応力度から許容ひずみへ、さらに鋼管では大地震時には管体の塑性変形まで許すことを基本とした設計体系へ移行しつつある。著者らはこれまで、管体の塑性変形を考慮し得る弾塑性解析法を定式化し³⁾、その手法を応用して過去の地震で多くの被害例が報告されている地盤急変部に埋設された管路の挙動などを検討してきた⁴⁾。しかし、埋設管の震害の考察という観点では、管路の曲管部の取り扱いには不十分な点が残されていた。その理由の一つは、曲管部に発生する塑性ひずみの評価が困難であることに起因し

※ 防衛大学校 理工学研究科学生 (〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

※※ 工博 防衛大学校 助教授 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

ている。曲管部の評価に関して、前述の設計指針では断面の偏平化によるたわみ係数を考慮した弾性設計式から求めた曲管部のひずみに応力指数（または応力集中係数）を乗じて得られる基準ひずみと許容ひずみとを比較する方法がとられている⁵⁾。しかし、このことは簡便な設計計算になるという長所がある反面、実際の曲管部の塑性域での挙動との関係などは不明確である。しかし、実際問題として管路系の曲管部に発生する塑性ひずみを解析的に評価することは難しいので、曲管部に関しては、管路中の一つの配管要素として独立に取り扱う方法、すなわち、曲管部としての許容変形量という形で評価することも考える必要があると思われる。曲管部の挙動に関する初期の研究として、Von Karman (1911) に始まる一連の研究の流れが鶴戸口⁶⁾によって解説されている。また、埋設管路の曲管部の大変形挙動については、原らにより実験的に研究されており⁷⁾、その結果は曲管部の許容変形量という形に整理されている。さらに、地震時の地盤変位の繰返しを考慮した低サイクル疲労については大沢らにより若干検討がなされている⁸⁾。

以上述べたように、埋設管路の曲管部の取り扱いにおいては、設計指針に示されているような現実の処理とともに、それに関連した若干の研究がみられるのみで、例えば許容変形量の決定について考えてみても、その基準となる量に関する考察や現在の設計指針との整合性など未解決の部分を残している。

本研究では、このような現状から配管要素としての曲管部の変形特性を塑性域まで追跡し、曲管部の許容変形量の決定に必要なデータを得るとともに、これらの結果を埋設管路の耐震性評価に応用する手法について検討することを目的としたものである。

本論文では、まず初めに 90° ロングエルボをもつ曲り管の载荷試験を行い、荷重～変位関係、曲管部周辺の荷重～ひずみ関係などを塑性域まで追跡し検討する。次に、各種形式による繰返し载荷試験を行い、管体に亀裂が発生するまでの履歴吸収エネルギーを求め、これらの量から曲管部の許容変形量を定めることの可能性を検討する。

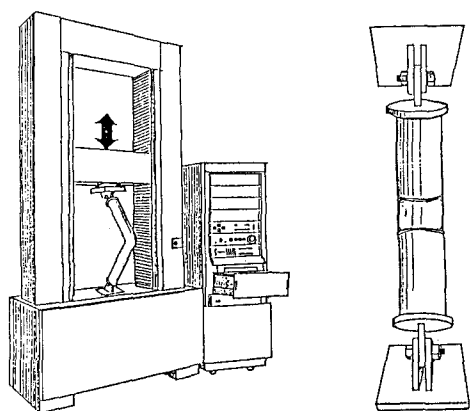
埋設管の曲管部としては、エルボのようなスムーズ形の他にマイターベンドと呼ばれる切管を溶接接合したのものもあるが、最近の新設管にはほとんど使用されなくなっているため、ここではエルボのみを取り扱っている。

2. 曲管部の大変形挙動 (SGP 100A 90° ロングエルボ)

2.1 実験の概要

载荷装置は、図-1(a),(b)に示すような変位制御型のインストロン万能試験機1127型（最大荷重25t）を用い、試験体を、クロスヘッド部と底部に取付用鋼板を製作してピン結合した。载荷は、クロスヘッドを上下させることで行った。

試験体は、図-2に示すように、SGP 100Aの 90° ロングエルボ（外径114.3 mm，肉厚4.5 mm，曲率半径152.4 mm）の両端に同種のストレート管（外径114.3 mm，肉厚4.5 mm，長さ350 mm）を溶接接合したものを使用した。この両端には試験機にボルト結合するた



(a) 载荷装置 (b) 試験体の取付状態

図-1 実験装置

め、径24mmの穴をあけた耳を溶接した鋼板で、めくら蓋をした。また、管の亀裂の発生を確認するため管の内部に 0.2 kg/cm^2 の圧縮空気を封入し、プレッシャーゲージを取付けた。本実験では、すべて同種類の管で、同寸法のもの8組を用意した。ひずみの測定は、図-3に示した位置

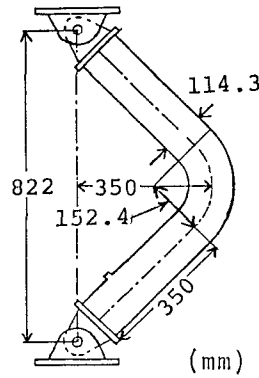


図-2 試験体の寸法

に、2軸および3軸のひずみゲージ（共和KFC-5-D16-11，KFC-5-D17-11，東京測器YCS-5-5LDA）を貼付して行った。また、カメラで各変位毎に管の移動量を測定するため管側面の中心線にラインを入れ、メッシュ枠を管の前方に取付けた。各データは、図-4に示す計測システムを構成して計測と処理を行った。また、偏平量は、各変位毎に $1/20\text{ mm}$ 読みのノギスで測定した。荷重～変位関係は、試験機に付属のロードセルと変位計を用い、チャートレコーダに記録した。

なお、実験に使用したロングエルボとは、鋼管を熱間で曲げ加工し、その後、熱処理して製造されるものである⁹⁾¹⁰⁾。したがって、加工による残留応力や塑性応力の影響は、大きくないと考えられる。また、一般に断面の肉厚は、曲げ腹側（内側）で増肉し、曲げ背側（外側）で減肉していると考えられる。曲げ加工後の肉厚の許容値に関するJIS規定では、SGP管に対して最小肉厚を公称肉厚の85%としている。今回実験に使用したものについての実測値を示せば、図-5のようになっている。また、素材の機械的性質については、今回実測していないが、SGP 100Aに関するデータとして、宮島らが埋設管の地震時塑性設計法の検討を目的として行った実験的研究¹¹⁾の中では、 σ_y （降伏点） $=22.1\text{ kg/mm}^2$ 、 σ_u （引っ張り強さ） $=37.8\text{ kg/mm}^2$ が得られている。そこでは、応力～ひずみ関係におよぼす繰返し載荷の影響についても検討されている。

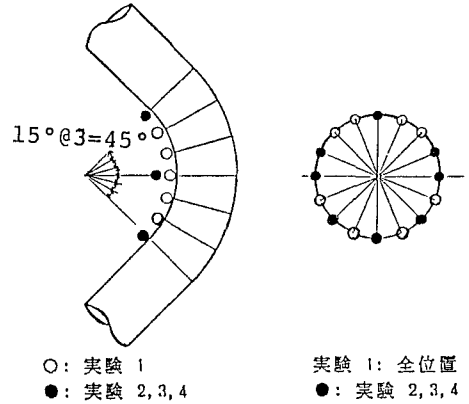


図-3 ひずみ測定位置

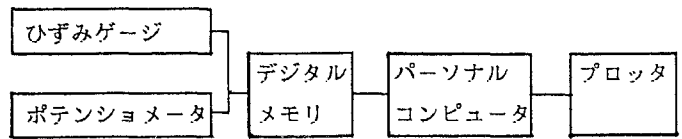


図-4 計測システム

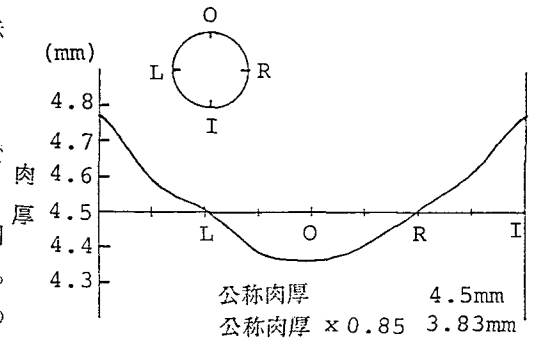


図-5 断面の肉厚分布

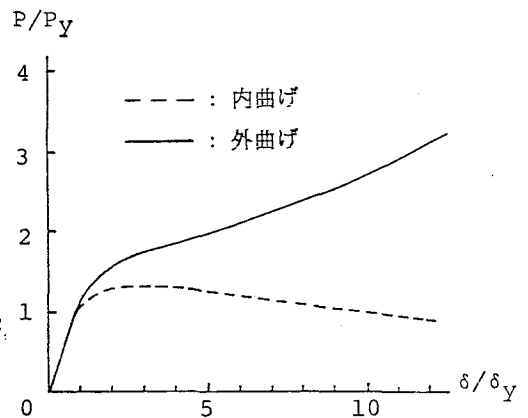


図-6 内曲げおよび外曲げの荷重～変位関係

2. 2 静的載荷試験の結果

ここでは、 90° ロングエルボの塑性域に至るまでの大変形挙動を明らかにすることを目的として、荷重と載荷点変位との関係、曲げモーメントおよび偏平量と曲げ角度変化率との関係、降伏荷重などを求めるために静的な内曲げ試験と外曲げ試験を行った。なお、ここで内曲げとは曲管部を閉じる方向を、外曲げとは曲管部を開く方向とする。

(1) 荷重(P)と管端部変位(δ)との関係について

まず、静的な内曲げ試験(実験 1,2)および外曲げ試験(実験 3)による大変形挙動を追跡するために行った実験 1～3の結果について考察する。図-6は、実験 1(内曲げ試験)および実験 3(外曲げ試験)での荷重～変位関係の全体の挙動を示したもので、縦軸は荷重を、横軸は載荷点変位を表わしている。全体の挙動として、内曲げ試験においては、最大荷重点以降では曲管の偏平化現象および内壁面の座屈によると思われる耐力の低下が顕著である。なお、この場合、載荷点変位 500mm(曲げ角度約 60°)でも管に亀裂が入ることはなかった。

外曲げ試験(実験 3)の結果は、降伏荷重に達した後、管が直線に近くなるため、みかけ上耐力は増加しているようにみえる。なお、表-1に実験 1～3の弾性限界荷重および弾性限界変位を示す。これらの図において、線形性のある立ち上がり部の実験データを最小二乗法で整理した荷重～変位関係に関する回帰式の係数およびたわみ係数と、比較のために Karman の第 3 次近似式($A-1$)¹²⁾および ANSI の値($A-2$)¹³⁾を用いたものを表-2に示す。なお、式の詳細などは付録に示した。

この結果から、内曲げ試験より得られた値は、Karman の近似式による値よりも現行の ANSI のたわみ係数の値に近いことがわかる。

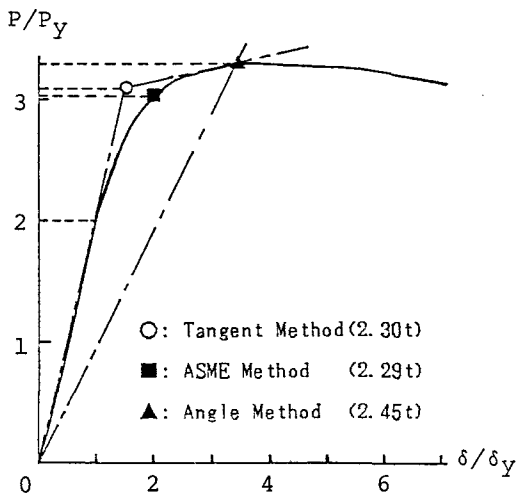


図-7 降伏荷重の決定

表-1 各実験における弾性限界荷重および弾性限界変位

	P_y (t)	δ_y (mm)
実験 1	1.50	7
実験 2	1.95	10
実験 3	2.10	8

表-2 荷重～変位の実験回帰式とたわみ係数

	実験 1	実験 2	実験 3	Karman	ANSI
係数 A	4.533	4.936	3.717	4.171	4.477
たわみ係数	7.356	8.098	5.853	6.689	7.252

回帰式 $\delta = A \cdot P$, 単位: (δ :mm, P :ton)

表-3 降伏荷重の値

	Ultimate load	Angle Method	0.2%Offset Method	Tangent Method	ASME Method
実験1	2.48	2.45	2.30	2.29	2.27
実験2	2.53	2.51	2.27	2.50	2.46

単位: (ton)

また、外曲げ試験（実験3）の値が小さいということは、外曲げより内曲げのほうがたわみ易いことを示している。次に、本実験の場合の降伏荷重を求める。ここでは、『ASME』によって推奨された手法およびその他の3つの方法を用い、その過程を図-7に示した。図-7は、図-6の内曲げ試験結果の50mmまでの部分を拡大したものである。表-3には、それらの結果として実験1および実験2の値を示した。この表から、Angle Methodにより求めた降伏荷重は、実験値の極限荷重 (Ultimate Load) にかなり近い値を示していることがわかる。

(2) 曲げモーメント(M) と曲げ角度変化率 (η) との関係について

曲管部の変形挙動を把握するため、曲げモーメントと曲げ角度変化率との関係について検討する。図-8は、実験1で得られた中央断面（最大曲げモーメント点）での曲げモーメント～曲げ角度変化率との関係を示したもので、縦軸は曲げモーメントを、横軸は曲げ角度変化率を表わしている。曲げモーメントは、変形前のアーム長さ(L) と荷重(P) との積を、曲げ角度変化率は、エルボ両端に接続する直管のなす角度変化の割合（曲管部での

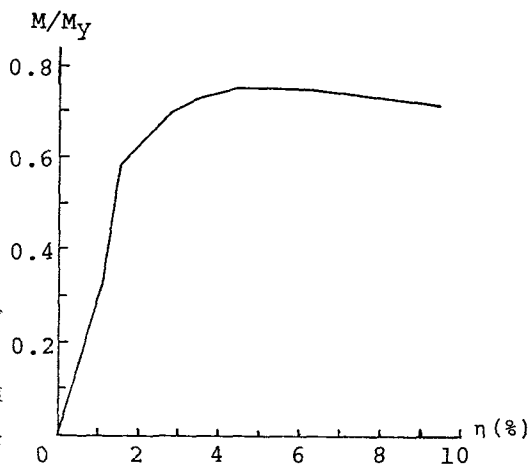


図-8 曲げモーメント～曲げ角度変化率関係

曲率変化をすべて中央断面で受け持つものと仮定する) を考えている。荷重～変位関係と同様に、曲げ角度変化率が増加すると曲げモーメントが低下している。表-4は、実験結果から得られた曲げモーメント～曲げ角度変化率の関係から得られたたわみ係数と、KarmanおよびANSIの値を示したものである（なお、KarmanおよびANSIの値は線形域では一定である）。実験値は、荷重～変位関係から得られたたわみ係数（表-2の値）より大きくなっている。

表-4 曲げモーメント～曲げ角度変化率関係から求めたたわみ係数

	実験 1	実験 2	実験 3	Karman	ANSI
たわみ係数	7.690	14.38	8.274	6.689	7.252

表-5 偏平量～曲げ角度変化率関係の実験回帰式

	実験 1	実験 2	実験 3	Karman
長軸方向係数 A	1.453	1.248	1.384	1.410
短軸方向係数 A	-1.154	-1.049	-0.979	-1.144

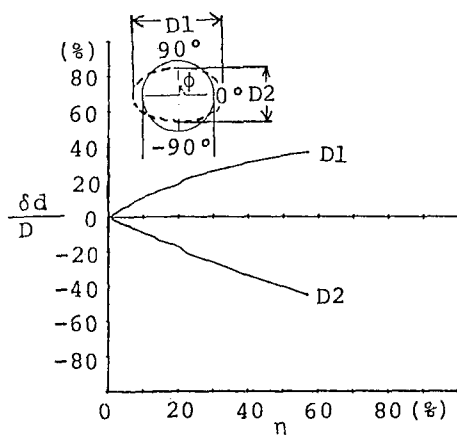


図-9 偏平率～曲げ角度変化率関係

回帰式 $\delta_d = A \cdot \eta$, 単位: (δ :mm, η :%)

(3) 偏平量 (δ_d) と曲げ角度変化率 (η) との関係について

偏平量は、各変位毎に $1/20\text{mm}$ 読みノギスを用いて3回計測し、その平均値を採用した。ここで、偏平量とはもとの直径に対する長軸および短軸の変位量とする。図-9は、実験1の偏平率と曲げ角度変化率との関係を示したもので、縦軸は偏平量を、横軸は曲げ角度変化率を表わしている。実験値から得られる回帰式の係数と、Karmanの近似式(A-3)による結果をまとめると表-5のようになる。実験結果は、Karmanの近似式による値に近い値を示している。

(4) 断面内のひずみ分布について

図-10(a),(b)は、それぞれ内曲げ(実験4)および外曲げ試験(実験3)における中央断面での管軸方向ひずみ(ϵ_x)と円周方向ひずみ(ϵ_θ)とを、各荷重段階で描いたものである(但し、()内の数値は荷重点変位)。荷重の偏心やゲージの接着状態などにより、必ずしも対称になっていないが、最大ひずみは、軸方向については 22.5° 、 -45° において生じ、荷重点変位 40mm で 17000μ で、円周方向については 0° および 180° において 32000μ であった。なお、この場合の角度は、エルボの腹側からみて右側面から左まわりにとったものである。

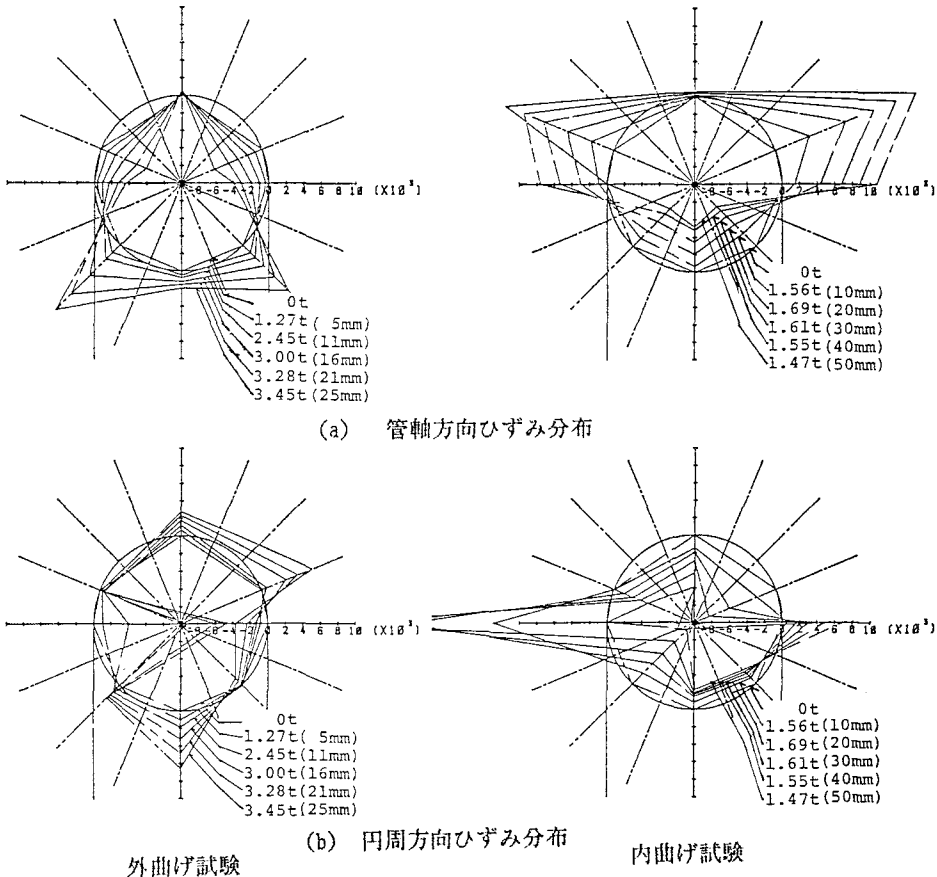


図-10 中央断面のひずみ分布

(5) 最大ひずみと変位量の関係について

図-11は、内曲げ（実験4）および外曲げ（実験3）の円周方向最大ひずみと変位量を示したもので、縦軸はひずみで、横軸は載荷点変位である。内曲げでは、2500 μ 程度までは直線的に増加し、それ以後急激に立ち上がっている。一方、外曲げでは内曲げと同様の傾向がみられるが、ひずみの値は内曲げに比較してかなり小さくなっている。

図-12 (a), (b)は、各実験における中央断面での変位5mmのときの、管軸方向ひずみ (ϵ_l) と円周方向ひずみ (ϵ_c) とから得られるそれぞれの方向の応力を、Beam theory応力で除した値、すなわち、応力集中係数 (β : 管軸方向応力集中係数, γ : 円周方向応力集中係数) を円周上でプロットしたものである。図中の曲線は、Karmanの第3次近似式による結果を示したものであるが、実験値と比較すれば値そのものには違いがみられるが、その傾向はよく合っている。また、図中の Δ は、外曲げ試験の値であるので他に示した内曲げ試験の値と異符号の値になっている。なお、図には比較のためClark & Reissner (C & R) の漸近式¹⁴⁾から求めた値と、ANSIによる応力集中係数の値も示した。

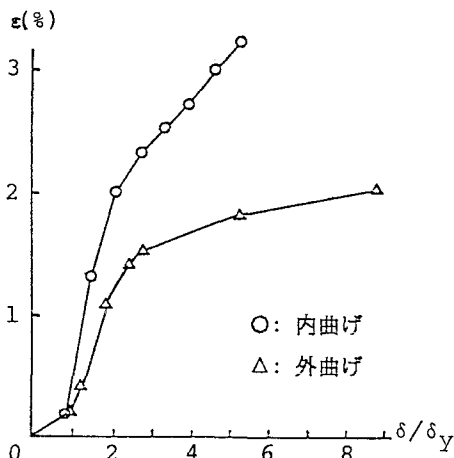
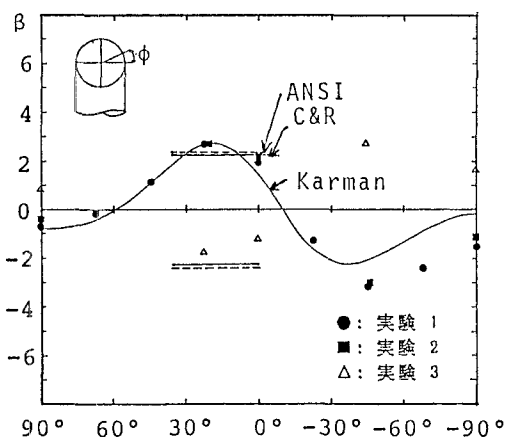
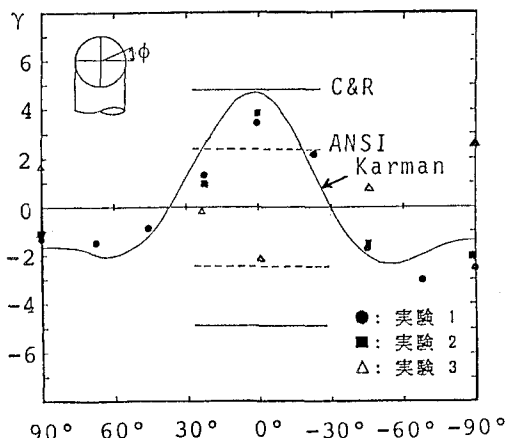


図-11 最大ひずみ～変位量関係



(a) 管軸方向



(b) 円周方向

図-12 応力集中係数

2. 3 繰返し載荷試験の結果

この実験は、管体に亀裂が発生するまでにその部分に吸収されるエネルギーを、定量的に評価することを目的としたものである。

図-13は、本実験で用いた5つの異なる両振りの載荷形式を示したものである。なお、実験ではすべて内曲げ方向からの両振り載荷を行い、管に亀裂が発生する（管の内部の圧縮空気が抜ける）まで繰返した。

一連の実験における載荷形式および結果の概要は表-6のようになる。表中の、LP-1は、50mmの一定

変位振幅の繰返しを、LP-2は、10mmからの各変位振幅を10回ずつ亀裂が生じるまでの繰返しを示している。LP-3は、LP-1の2倍の100mmの一定変位振幅の繰返しを、また、LP-4は、30mmの一定変位振幅で50回繰返した後、50mmの一定変位振幅で亀裂が生じるまで繰り返すことを表わしている。LP-5は、20mmの一定変位振幅で50回繰返した後、50mmの一定変位振幅で亀裂が生じるまで表わしている。なお、今回行った繰返し実験における載荷速度はすべて50mm/minとした。

図-14に、亀裂発生までの各載荷形式による荷重～変位の履歴曲線を示す。これらの履歴曲線から、（1）管の剛性は繰返し回数とともに徐々に低下していること、（2）全般的に、内曲げでは耐力が低下し、逆に外曲げでは荷重が直線的に増加しており、同じ変形量では内曲げの約2倍の値となっていること、などがわかる。このような履歴を受けると、結果的にすべて図-15の部分で亀裂が発生した。これは、曲管部のひずみの集中点（内曲げでは長軸端部）では塑性化が進み、一度塑性化した部分は逆に力を作用させても完全に元に戻ることができず、繰返しとともにその部分にひずみが蓄積されたためと考えられる。

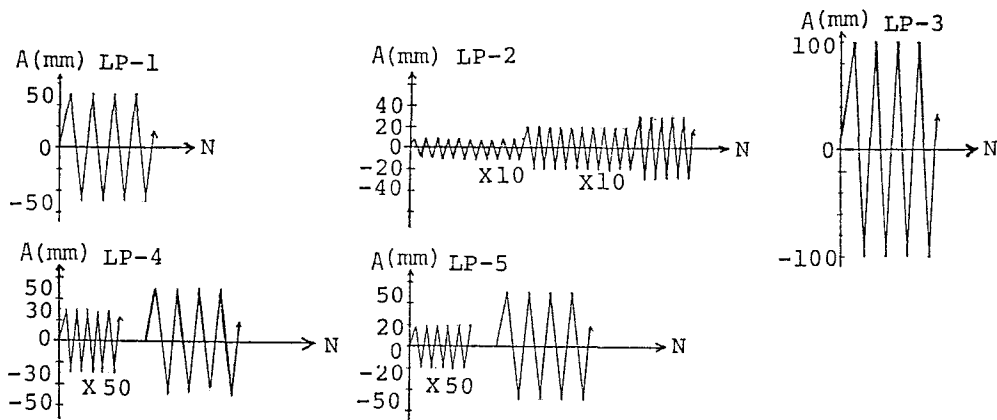


図- 13 載荷形式

表- 6 実験の種類と結果の概要

実験 No.	載荷形式	亀裂までの回数	亀裂の位置
実験 1	500mm 内曲げ	なし	なし
実験 2	90mm 内曲げ後 50mm ×10, 60mm×9 繰返し	60mm×9	曲管本体
実験 3	100mm 外曲げ後 10mm ×5,10mmずつの漸増繰返し	70mm×4	曲管本体
実験 4	LP- 1	33	曲管本体
実験 5	LP- 2	60mm×9	曲管本体
実験 6	LP- 3	8	曲管本体
実験 7	LP- 4	50mm×20	曲管本体
実験 8	LP- 5	50mm×22	曲管本体

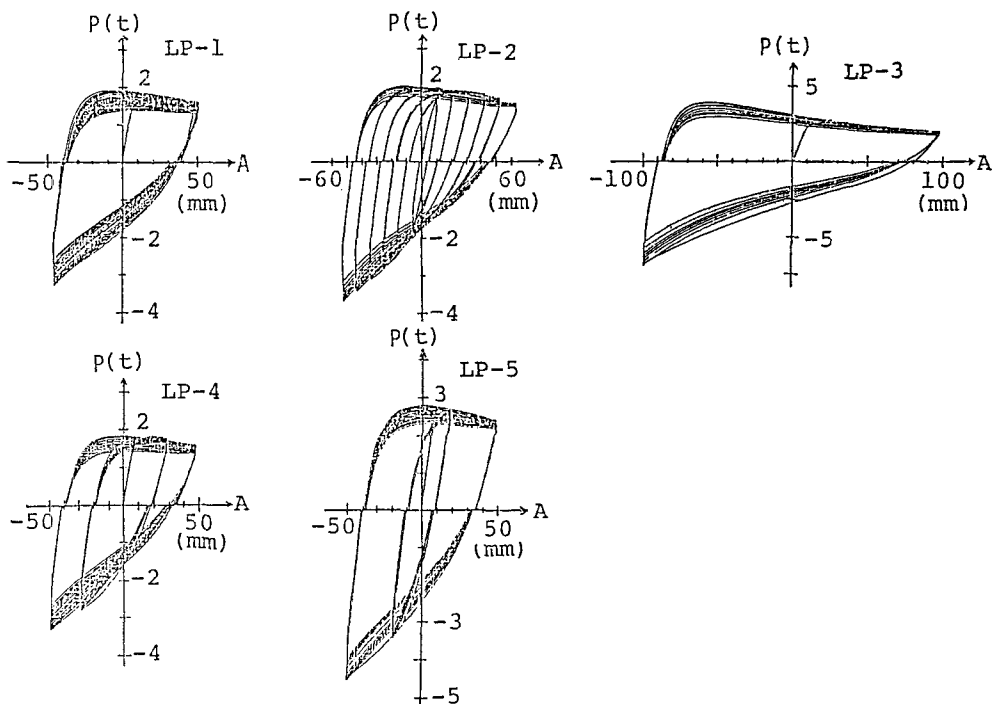


図- 14 各載荷形式による荷重～変位履歴曲線

3. 曲管部の許容変形量の評価

(1) 管路系の許容変形量の考え方

本項では、これまでに述べた曲管部に関する実験結果をもとに曲管部における耐震性の評価基準について考える。

現在、埋設管路の耐震性評価は、与えられた条件のもとで計算された配管系各部のひずみと、疲労曲線から地震時の等価繰り返し回数などを考慮して求められた許容ひずみ（例えば、高圧ガス導管では1%，中低圧ガス導管では3%）とを比較することにより行われている。しかし、地震時に任意の地盤変位を受ける埋設管路の曲管部での応力状態を、塑性域まで解析的に評価することは困難である。

したがって、曲管部などに関しては、その部分を独立した配管要素と考え、適当な方法で定められた許容変形量によって評価する方が合理的であると思われる。

配管要素の許容変形量を定めるためには、導管が破壊に至るときの配管系各部分の変形を知る必要がある。ここで、導管の破壊とは、導管としての機能が損なわれる状態であると考え、一般的にはつぎのような状態に達した時点が破壊と定義されている⁷⁾。

- (1) 管内流体の漏洩またはクラックが発生した場合
- (2) 管の断面変形によって所定の流量が得られなくなった場合
- (3) その他、導管としての機能が損なわれた場合

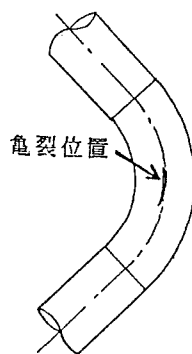


図- 15 亀裂の発生位置

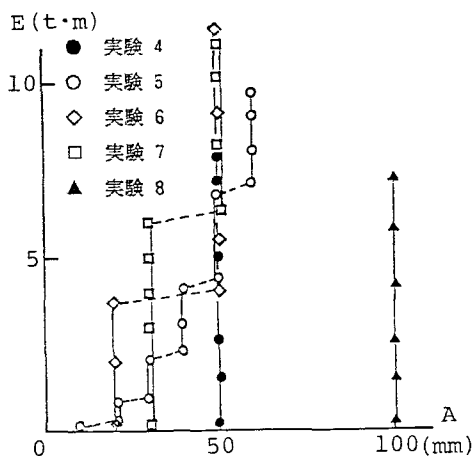


図- 16 累積履歴吸収エネルギー
～変位振幅関係

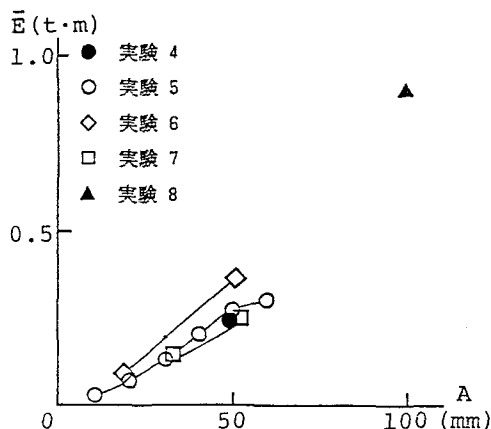


図- 17 1サイクルの平均履歴吸収
エネルギー～変位振幅関係

これらの定義のうち、ここでは(1)の導管中に、ある1箇所でもクラック(あるいは破断)が生じた時点をもって、配管系の破壊と定義し、現在の設計指針なども考慮したうえで、許容変形量を定めることを試み、さらに、その量が破壊に至るまでの曲管部での履歴吸収エネルギーとどのような関係にあるかを考察する。

(2) 90° ロングエルボの許容変形量と 履歴吸収エネルギー

図- 11 に示した最大ひずみと変位量との関係から、ガス導管耐震設計指針における中低圧ガス導管の許容ひずみ3%に対するこの場合の許容変形量(載荷点変位)として約40

mmが得られる。この値は、2. 3で述べた繰返し載荷試験結果から予想される地震時の地盤変位の等価繰返し回数40～50回で管体にクラックが生ずる載荷点変位ともほぼ一致する。

次に、このようにして得られた許容変形量を、管が破壊に至るまでの履歴吸収エネルギーとの関係から考察する。

図- 16 は、図- 14 の結果をもとに各実験における破壊に至るまでの累積履歴吸収エネルギーと与えた変位振幅との関係を示したものである。この図から、(1) 静的耐力をはるかに超えた変位振幅50mm, 100mmに対して行った実験(4, 8)の結果では、破壊に至るまでの繰返し回数は、それぞれ33回, 8回と異なっているが、累積履歴吸収エネルギーはほぼ等しくなっていること、(2) 実験5, 6, 7は、降伏耐力、あるいはそれ以下の変位振幅での繰返しを含んでいるので、結果的には履歴吸収エネルギーが大きくなっていること、などがわかる。

図- 17 は、1サイクルの平均履歴吸収エネルギーと変位振幅との関係を示したもので、当然のことながら、履歴吸収エネルギーは振幅に対してほぼ直線的に増加している。また、これらの関係を単位変位振幅当

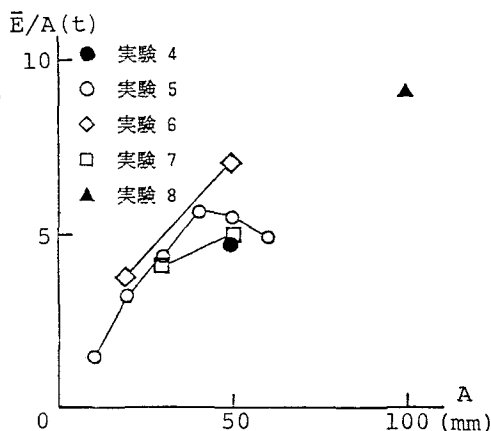


図- 18 単位変位振幅当たりの1サイクルの平均
履歴吸収エネルギー～変位振幅関係

たりの値として示せば、図-18のようになり、この関係は繰返し実験における各載荷段階での耐力の低下を表わしている。

これらの結果をもとに、図-16の結果を補正してみる。すなわち、破壊に直接影響するのは40mm以上の変位振幅での繰返しであると考え、その部分のみの履歴吸収エネルギーを求めてみると、実験4、5、6、8では7.2~7.9(t・m)とほぼ同じレベルの値になる。実験7は、 δ_a に近い変位振幅30mmでの50回の繰返しを含んでいるため、変位振幅50mm段階での耐力が著しく低下している（図-17、18）、この場合5.1(t・m)と非常に低い値になっている。

以上、静的および繰返し実験の結果をもとに許容変形量を定め、この値を曲管部での履歴吸収エネルギーという観点から考察してみた。その結果、実験データのばらつきや履歴吸収エネルギーの算定に考慮すべき変位レベルの設定などに問題点は残っているが、このような考え方は曲管部の許容変形量を定めるための一つの方法になりうるものと思われる。

一方、材料や構造物の累積損傷については従来から多くの研究があり¹⁵⁾⁻²⁰⁾、それらの一つの成果として、埋設管の分野でも『ASME』の考え方に基づいて、許容ひずみが設定されている。しかし、ここで取り扱った曲管部などのような構造物や部材レベルでの評価についてはまだ不明確な部分が多い。その理由の一つは、取り扱う構造形式やその材料の特性による影響がどのような形で現われてくるかが不明であることによるものと考えられる。今後は、素材の性質や断面寸法などの幾何学的特性を考慮しながら、曲管部における履歴吸収エネルギーの分布状態などについても検討していく必要があると思われる。

4. 結 言

本研究は、埋設管路曲管部の耐震性評価を目的として、90°ロングエルボの大変形挙動を静的実験と繰返し実験によって確かめ、その結果をもとに曲管部の許容変形量について考察したものである。本研究の成果を列挙すれば以下のようになる。

(1) 弾性範囲におけるたわみ係数、応力集中係数、曲げモーメントおよび偏平量と曲げ角度変化率との関係、さらには降伏荷重などについて、既存の諸理論による計算結果を実験結果により確かめることができた。

(2) 内曲げ試験および外曲げ試験によって、90°ロングエルボの大変形挙動を静的ひずみレベルとして3%を超えるところまで追跡することができた。また、静的な変位によっては載荷点変位500mm（曲げ角度約60°）というかなり大きい変位でも管体に亀裂は発生しないことがわかった。

(3) 現行の設計基準での許容ひずみを考慮したうえで、今回行った静的および繰返し実験の結果から、90°ロングエルボ（SGP100A）の許容変形量として、この場合載荷点変位では約40mmが得られた。

(4) 繰返し試験によって各載荷形式毎の破壊（亀裂の発生）までの繰返し回数および累積履歴吸収エネルギーを求めることができた。その結果、一定の振幅（50mm、100mm）では、回数は33回、8回と異なるが、破壊に至るまでの累積履歴吸収エネルギーはほぼ等しくなっていることがわかった。

(5) 変位振幅を漸増させた場合の累積履歴吸収エネルギーは、一定振幅の場合に比して、降伏耐力、あるいはそれ以下の変位振幅での繰返しを含んでいるのでかなり大きくなっているが、先に定めた許容変形量を考慮して補正すれば、破壊に至るまでのエネルギーレベルとしてはほぼ一定になることがわかった。

(6) この許容変形量を履歴吸収エネルギーとの関係で評価するためには、曲管部における履歴吸収エネルギーの分布状態や載荷形式の違いによる影響などについての検討が必要であると思われる。

以上の結果は、限定された条件のもとでの実験結果によるものであるが、曲管部の許容変形量について1つの定量的な解釈をすることができた。今後は、(1)埋設状態での実験も含め合理的な許容変形量の算定についてさらに検討を進めるとともに、(2)本実験によって得られた曲管部の履歴曲線を用いた埋設管路の弾塑性解析を行うことを考えている。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京ガス技術研究所西尾宣明室長および日本鋼管技術研究所鈴木信久氏には、供試体の作成や実験の方法などについて貴重な御助言を頂いた。また、防衛大学校研究員大野友則氏には、論文の内容に関して貴重な御討議を頂いた。付記して謝意を表します。なお、本実験で使用したインストロン万能試験機は、防衛大学校機械教室のものであり、使用に際して多大の御援助と御配慮を賜った中村義一先生、平山恵一先生に厚く御礼申し上げます。

(付 録) Karman理論による近似解法および ANSI の式

直管部にはBeam Theory を、曲管部にはKarman理論を用いたGross & Ford による荷重と移動端の変位の関係式、およびANSIのたわみ係数の式は、以下のようになる。

$$\delta = \frac{P}{12E} \left\{ \frac{4L^3}{I_t} + \frac{KR}{I_b} \{ 3\pi L^2 + 6RL(4-\pi) + 6R^2(\pi-3) \} \right\} \quad (A-1)$$

$$K = \frac{1.65}{\lambda} = 7.252 \quad (A-2)$$

また、曲げモーメントと曲げ角度変化率の関係は、

$$\eta = (1-\nu^2) k \frac{MR}{EI_b} \quad (A-3)$$

さらに、半径方向の変位量と曲げモーメントの関係についてKarmanの式を用いると次のようになる。

$$W = (1 - \nu^2) k \frac{MRr}{EI_b} \frac{H(\lambda) \cos 2\phi + \frac{16}{5} J(\lambda) \cos 4\phi + \frac{504}{10} \cos 6\phi}{X(\lambda)} \quad (A - 4)$$

$$\delta_d = 2r\eta \left\{ \frac{H(\lambda) \cos 2\phi + \frac{16}{5} J(\lambda) \cos 4\phi + \frac{504}{10} \cos 6\phi}{X(\lambda)} \right\} \quad (A - 5)$$

$$\begin{aligned} H(\lambda) &= 332 + 94176 \lambda^2 + 2822400 \lambda^4 \\ J(\lambda) &= 37 + 7350 \lambda^2 \\ X(\lambda) &= 252 + 73912 \lambda^2 + 2446176 \lambda^4 + 2822400 \lambda^6 \end{aligned}$$

ここで、L:直管の長さ、R:エルボの曲率半径、E:ヤング率、 I_t : 直管の断面 2次モーメント、 I_b : エルボの断面 2次モーメント、K:たわみ係数(=6.689)、 λ : パイプ係数(=0.2275)、r:管の平均半径、 ν : ポアソン比、W:半径方向の変位量、 ϕ : 断面での位置。

参考文献

- 1) 日本ガス協会: 日本海中部地震と都市ガス, 1984.2.
- 2) 日本ガス協会: ガス導管耐震設計指針, 1982.
- 3) 佐藤紘志・香月 智・石川信隆: 強制地盤変形を受ける平面埋設管路の弾塑性解析, 土木学会論文集, Vol.350, pp.217-226, 1984.10.
- 4) 佐藤紘志・石川信隆: 地盤急変部における埋設管路の地震時挙動に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.31A, pp.427-437, 1985.3.
- 5) 前出 2) pp.221-244.
- 6) 鶴戸口英善他: 薄肉わん曲管の応力と変形について, 高圧力, Vol.6, No.3, pp.34-42, 1968.
- 7) 原 淳他: 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.
- 8) 大沢泰晴・中野 隆: 配管要素の低サイクル疲労実験(1), 配管・装置・プラント技術, pp.87-90, 1983.3.
- 9) 花本幸満: 高周波誘導加熱による小R曲げ加工(ネック付きエルボ), 配管技術, pp.91-98, 1979.5.
- 10) 竹山輝義: 高周波誘導加熱を利用した管曲げ加工の原理について, 配管技術, pp.138-164, 1971.8.
- 11) 宮島信雄・大隅史雄・松岡和巳: 埋設管の地震時塑性設計法の検討, 製鉄研究第 306号, pp.1-6, 1981.
- 12) Gross, N.: Experiments in Short-Radius Pipe Bends, Proceedings of Mechanics Engineers, (B), Vol.1B, pp.465-479, 1952-1953.
- 13) L.Beskin,: Bending of Curved Thin Tubes, J.Applied Mechanics, Vol.12, pp.1-7, 1945.

- 14) R.A.Clark and E.Reissner: Bending of Curved Tubes,Advances in Applied Mechanics,Vol.3,
pp.93 - 122, Academic Press,Inc.,1951.
- 15) 河本 実・鯉淵興二: 塑性領域における疲労現象について(1),(2),材料Vol.12,No.115,pp.2-9,Vol.12,
No.117,pp.3-10,1963.
- 16) 中川隆夫・徳納久睦・空野信吉: 低繰返し数疲れに及ぼす平均ひずみの影響, 日本機械学会論文集
(第 1部),Vol.41,No.349,pp.2511-2517,1975.
- 17) A.R.C.Markl,"Fatigue Tests of Piping Components,"Trans. of the ASME,Vol.74,pp.287-303,1952.
- 18) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版会, 1980.
- 19) 宮島信雄・宮内二郎・大隅史雄: バイブライン曲管部の埋設時挙動に関する実験的研究, 第13回土質工
学研究発表会, pp.1289-1292,1978.
- 20) T.Ohno and T.Nishioka:An Experimental Study on Energy Absorption Capacity of Columns in
Reinforced Concrete Structures,Proc.of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng.,Vol.1,No.2,
pp.23-33,1984.

(1985年10月18日受付)