

初期変形を受けた曲管の極低サイクル疲労強度

VERY LOW-CYCLE FATIGUE STRENGTH OF ELBOWS HAVING INITIAL IN-PLANE BENDING DEFORMATION

鈴木 信久* 那須 卓* 矢野 達夫*

By Nobuhisa SUZUKI, Masaru NASU and Tatsuo YANO

Very low-cycle fatigue strength of elbows is discussed in this paper, which are subject to in-plane cyclic bending and have initial in-plane bending deformation. Firstly, a deformation of elbow which is a part of buried pipeline is determined by finite element method. And then, a series of low-cycle fatigue tests was run on the elbows. Also non-linear finite element analysis was conducted to estimate the maximum strain of the elbows.

Based on the results, the initial deformation of the elbows has an effect on the fatigue strength of the elbows. The fatigue strength increases due to the effect of the initial deformation when the elbows are initially bent in the direction which increase curvature. On the contrary, the fatigue strength decreases when the elbows are initially bent in the direction which decrease curvature.

1 はじめに

埋設溶接鋼管の耐震強度は、解析等によって埋設管に発生する最大ひずみ振幅を求め、材料の疲労強度を考慮して検討するのが一般的である^{1), 2)}。しかし、地盤の永久変位等の静的変形によって初期変形を受けた溶接鋼管の一般的な検討方法は特に規定されていないようである。

たとえば、鋼材に30%程度の初期ひずみが存在しても、材料の疲労強度には特に大きな影響は無いことが知られている³⁾。さらに、鋼材は延性に富むため、破断ひずみは40%を超えることも知られている。また埋設管としての溶接鋼管に関しては、初期変形の無い場合の疲労強度はある程度検討されているが^{4), 5)}、上述のように、初期変形がある場合の疲労強度に関する実験データは見あたらないようである。

そこで本研究では、まず埋設曲管(エルボ)の曲げ変形と地盤ひずみの関係を有限要素解析により求め、次に、初期曲げ変形を受けた鋼製エルボの低サイクル疲労強度を実管試験により確認した。最後に、エルボの疲労強度に対する初期曲げ変形の影響について検討し、初期曲げ変形量と曲げ変形量振幅とから、疲労強度を求める実験式を導いた。

* NKK エンジニアリング研究所 川崎第一研究部 (〒211 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1-1)

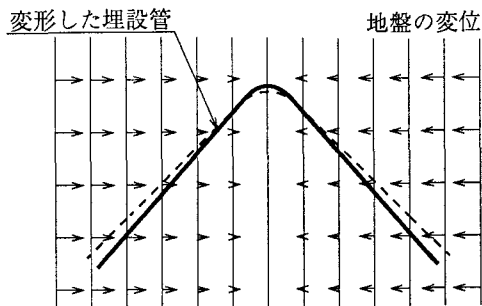
2 地盤変位とエルボの曲げ変形

2.1 解析モデル

地盤の液状化などにより生じる様な地盤ひずみが、図1のような曲管を含む埋設管路に作用する場合、直管部よりも曲管部に曲げ変形が集中する。またこの変形の大きさは、同じ地盤ひずみの大きさでも図2のように管路に作用する方向によって異なる。また、このような初期曲げ変形を受けた埋設管は、その変形特性が変化しているため、後で地震動による様な繰返し地盤ひずみを受けたときに(図3)、初期曲げ変形の無いエルボとは、発生するピークひずみの大きさが異なることになる。そこで、まず初期曲げ変形の大きさを知るために、地盤ひずみの方向とエルボの角変形との関係を、はりモデルを用いた有限要素解析により求めた。

解析対象曲管は、SGP150A 90°ロングエルボ(配管用炭素鋼鋼管, 165.2mmφ×4.5mm; 以下単にエルボと呼ぶ)とした。解析モデルは、図4に示すように両端に半無限の直管が接続する埋設管とし、直管部分に地盤を表すバネを管軸方向と管軸直角方向に取り付けた。エルボ部分の地盤バネは省略し、地盤による断面変形の拘束は考慮しなかった。地盤バネ定数の設定は、ガス導管耐震設計指針(中低圧)¹⁾により、図5に示すように設定した。

埋設管路に地盤ひずみの作用する入射角 θ は、エルボの対称面(中央断面)に対して $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲とし、エルボに発生するピークひずみを求めた。図2に示したように、 $\theta = 0^\circ$ が地盤ひずみがエルボの対称面に直角に作用する場合で、 $\theta = 90^\circ$ が平行に作用する場合である。



埋設管に地盤の圧縮ひずみが作用する場合

図1 地盤ひずみと埋設管の変形

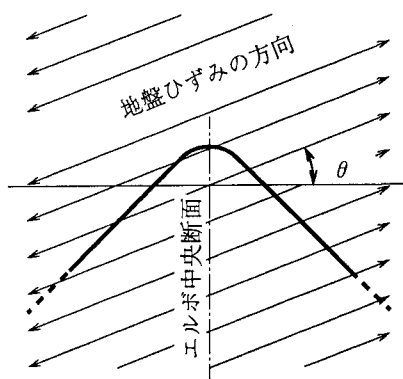


図2 地盤ひずみの作用方向

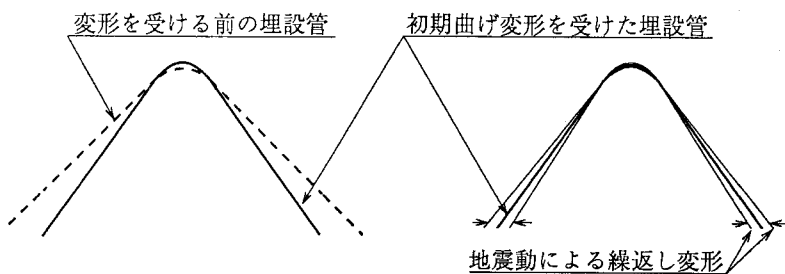


図3 初期曲げ変形と繰返し変形

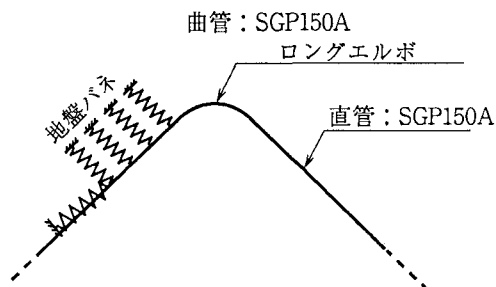


図4 埋設管変形解析モデル

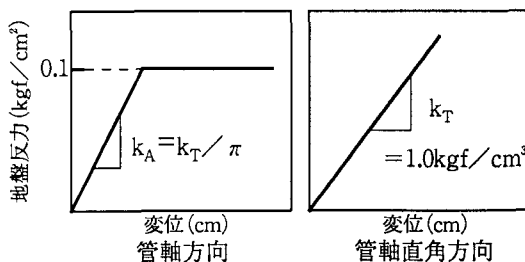


図5 解析地盤条件

2.2 地盤ひずみとエルボの変形の関係

エルボに曲げモーメントが作用すると、ピークひずみはエルボ中央の内面周方向に発生する。この内面ピークひずみ ε_p と地盤ひずみ ε_g の関係を、 $\theta=0^\circ$ の場合および $\theta=90^\circ$ の場合について、図6に示す。

ε_g が $\pm 0.3\%$ 以下の範囲では、 $\theta=0^\circ$ の場合も $\theta=90^\circ$ の場合も ε_p の大きさは変わらない。しかし ε_g が $\pm 0.3\%$ を超えると、 $\theta=0^\circ$ の場合の方が $\theta=90^\circ$ の場合よりも、 ε_p は2倍以上大きくなっている。また ε_g が引張ひずみの場合よりも圧縮ひずみの場合の方が、 ε_p の増加が大きくなっている。結局、エルボの対称面に直角に圧縮ひずみが作用する場合に、エルボに発生するピークひずみは最大となる。

エルボの角変形 ω と地盤ひずみの関係を図7に示す。 ω はエルボの回転率で、エルボ両端における相対回転角($\Delta\phi$)とエルボの曲がり角度($\phi; 90^\circ$)との比($\Delta\phi/\phi$)であり、内曲げの場合は正、外曲げの場合は負である。 ω も、地盤ひずみが圧縮ひずみの場合の方が引張ひずみの場合よりも約2倍大きくなっている。

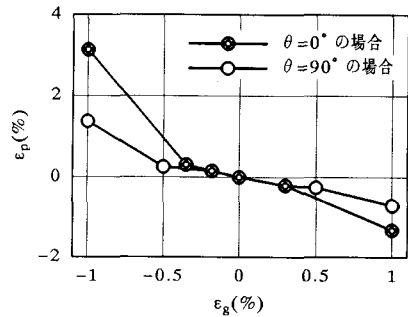


図6 ピークひずみと地盤ひずみの関係

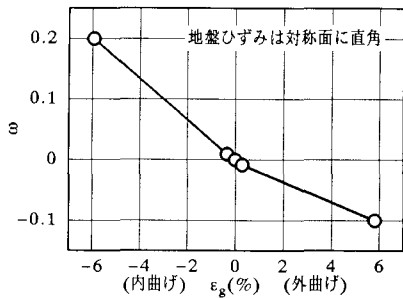


図7 角変形と地盤ひずみの関係

3 実管疲労試験

3.1 実験の概要

エルボに曲げ変形を与えるために、図8に示すような試験装置を用いて、図1に示した状況を再現する実管疲労試験を行った。供試体には、SGP150Aロングエルボを使用した。実験では、まず、エルボに内面曲げ変形を与え、次に繰返し変形を初期変形を増加させる方向から始め、図9に示す振幅 Δd を一一定に保った。実験では内面にひずみゲージが貼れないので、エルボ外面のひずみを測定した。ひずみ測定位置を図10に示す。疲労き裂の貫通は、あらかじめ供試体に空気圧(0.1kgf/cm²)を与え、その漏洩によって判定した。

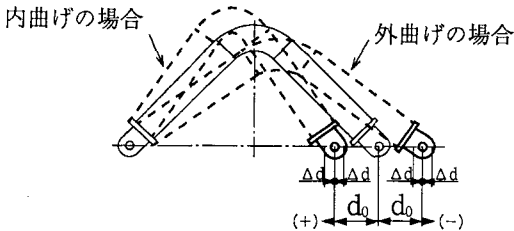


図9 初期変形と変位振幅

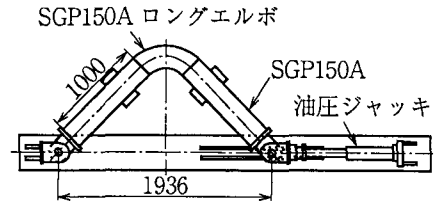


図8 供試体および試験装置概要

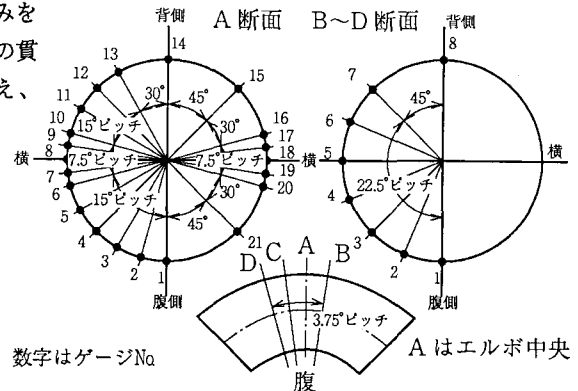


図10 ひずみ測定位置

3.2 実験条件

実験条件を設定するために、有限要素法による変形解析を行った。解析には汎用有限要素解析プログラムを用い、解析モデルは図11に示すように4節点シェル要素を用いて離散化した。エルボおよび鋼管の材料特性は、圧縮と引張とで対称で等方硬化すると仮定した。材料特性を図12に示す。解析は繰返し変形の1サイクル目終了まで、つまり、最初の最大変位点（初期曲げ変形を与えた段階からさらに変位振幅分の変位した点）から2度目の最大変位点までの間の変形履歴について、角変形およびピークひずみ振幅を求めた。

各実験条件における初期変形 d_0 および変位振幅 Δd に対応する、エルボ端の相対回転率 ω_0 、 $\Delta \omega$ を表1に示す。実験条件として与えた ω_0 ($-0.122 \sim 0.118$) は、前章の有限要素解析結果から、一様な地盤ひずみ $\epsilon_0 = -3\% \sim -6\%$ によって発生する初期曲げ変形に相当する。

エルボに曲げモーメントが作用すると、断面の偏平化によって生じる周方向ひずみが最大で、外面よりも内面の方が大きい⁴⁾。この内外面のひずみレベルの差は、断面の塑性変形が進むにつれて大きくなる。例として、最も曲げ変形が大きく断面変形の進んだCASE3の最大変位点 ($\omega_0 + \Delta \omega = 0.166$) における、エルボ中央断面周方向ひずみ分布の内外面における比較を図13に示す。外面の最大値が7%程度であるのに対して、内面では25%以上のひずみが発生している。

エルボ内面のピークひずみ振幅 $\Delta \epsilon$ を、表1に合わせて示す。 $\Delta \omega = 0.05$ の場合 (CASE3～8) について、 $\Delta \epsilon$ と初期曲げ変形 ω_0 の関係を図14に示す。初期曲げ変形が内曲げの場合には、 ω_0 の増加に伴って $\Delta \epsilon$ は漸減しているが、初期曲げ変形が外曲げの場合には、 ω_0 の増加に伴って $\Delta \epsilon$ は増大している。

表1 実験条件

CASE	実験条件		解析値		
	初期変形 d_0 (mm)	変位振幅 Δd (mm)	初期変形 ω_0	角度振幅 $\Delta \omega$	ひずみ振幅 $\Delta \epsilon$ (%)
1	110	55	0.074	0.035	3.83
2	110	100	0.074	0.065	9.32
3	175	75	0.118	0.048	5.94
4	0	75	0.000	0.050	7.09
5	-110	75	-0.075	0.052	9.87
6	-175	75	-0.122	0.053	10.52
7	-50	75	-0.032	0.049	8.35
8*	110	75	0.074	0.048	6.11

* CASE8はひずみ振幅のみを求め、実験は行わなかった。

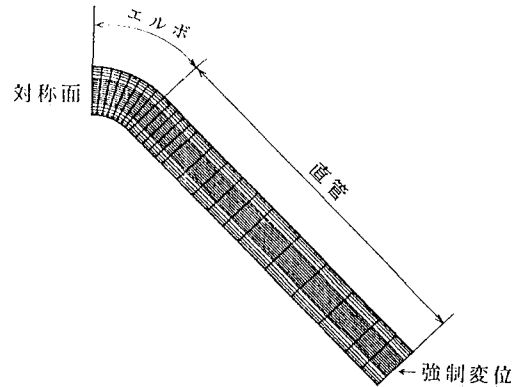


図11 変形解析モデル

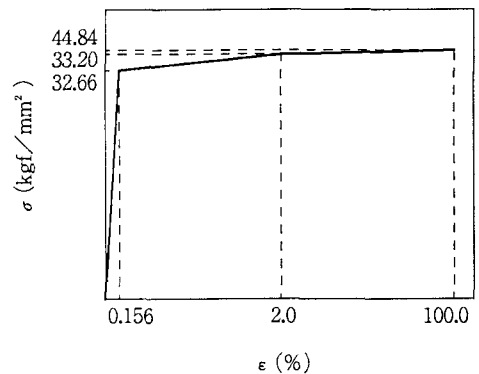


図12 材料特性

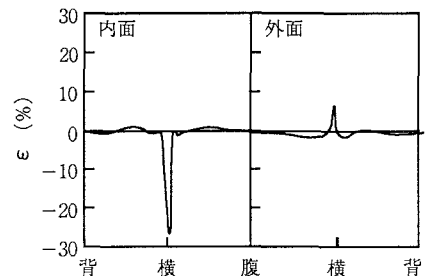


図13 内外面周方向ひずみ分布の比較

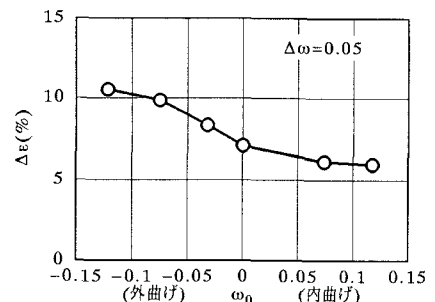


図14 ピークひずみと初期曲げ変形の関係

3.3 実験結果

き裂貫通までの繰返し変形回数、および測定された外面最大ひずみ振幅を表2に示す。全ての供試体で、き裂は図15に示すように、断面変形によるひずみの集中するエルボ脇にエルボの長手方向に管外表面から発生した。

最大ひずみは、図16に示すように、エルボの横の位置から7.5°腹側の位置で測定された。前章で述べた変形解析によれば、実際の外面ピークひずみは、この測定位置と横との間に発生している。

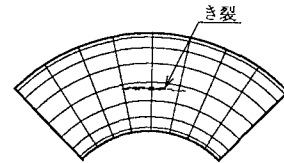
いづれの実験結果も、外面最大ひずみ振幅は内面ピークひずみ振幅(表1)の1/5程度となっている。これは、図13に示したように、内面において外面よりも急激にピークひずみが立ち上がるためである。

外面最大ひずみと変位の関係の例(CASE4)を、図17に示す。繰返し変形に伴ってひずみ振幅はほぼ一定であるが、平均ひずみは増加していることがわかる。

変位振幅を一定($\Delta d = 75\text{mm}$, $\Delta \omega = 0.05$)とした場合の、①初期曲げ変形の無い場合、②初期曲げ変形が内曲げの場合($\omega_0 = 0.118$)、③初期曲げ変形が外曲げの場合($\omega_0 = -0.122$)の、3ケースについて、外面最大ひずみ(エルボ脇における周方向ひずみ)の挙動を図18に示す。これらのひずみ挙動からわかるように、内曲げ初期曲げ変形がある方が、初期曲げ変形の無い場合よりも平均ひずみは大きい。また初期曲げ変形が外曲げの場合には、平均ひずみおよびひずみ振幅共に増加している。このように初期曲げ変形が内曲げであるか外曲げであるかによって、ピークひずみの挙動も異なる。実験では測定していないが、内面ピークひずみも同様の挙動を示すと考えられる。

表2 実験結果

CASE	き裂貫通回数 N	外面ひずみ振幅
1	349	0.74
2	90	1.61
3	190	1.03
4	108	1.75
5	47	1.74
6	40	2.70
7	85	1.82



CASE6

図15 き裂発生位置

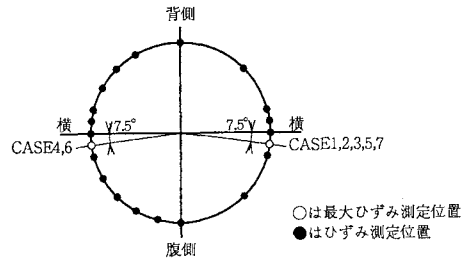


図16 最大ひずみ測定位置

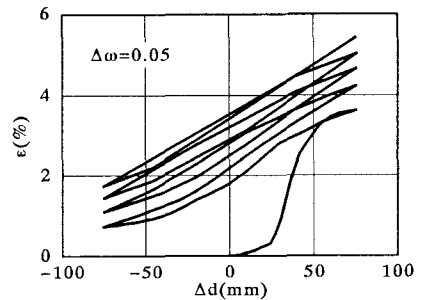


図17 外面最大ひずみと変位の関係

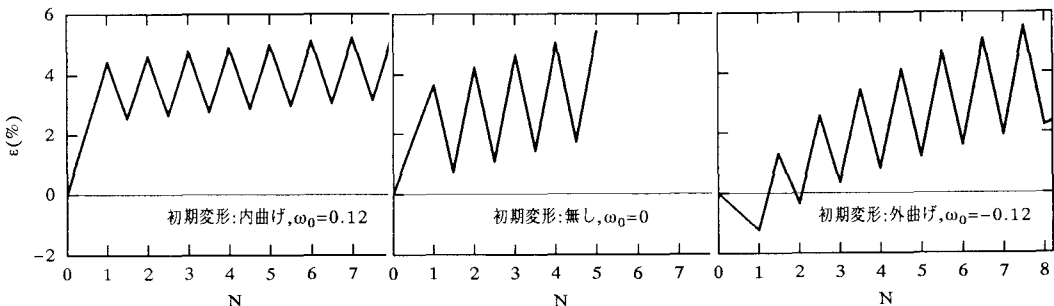


図18 外面最大ひずみの繰返し挙動($\Delta \omega = 0.05$)

4 初期曲げ変形と疲労強度の関係

4.1 疲労強度推定式

疲労強度の推定は、最大ひずみ振幅を解析等によって求め、ASMEの設計疲労曲線²⁾を用いて疲労寿命を求めるのが一般的である。有限要素法等による詳細な変形解析を行わずにエルボの疲労強度を推定するためには、 $\Delta\omega$ から疲労寿命を直接求める必要があるが、ASMEの設計疲労曲線に相当する $\Delta\omega_a$ と疲労寿命 N の関係は、ASMEの角変形とピークひずみの関係諸式⁶⁾から、次の式(1)のように表される⁷⁾。また、同様にASMEの最適疲労曲線に相当する $\Delta\omega_b$ と N の関係は、式(2)のように表される。 R はエルボの曲率半径、 r は外半径、 t は板厚、 λ はパイプ係数($=Rt/r^2$)である。

$$\Delta\omega_a = \frac{0.846}{\lambda^{1/3}} \frac{R}{r} * ((4.73 * N^{-0.426} + 0.0387) / 100) \quad \dots (1)$$

$$\Delta\omega_b = \frac{0.846}{\lambda^{1/3}} \frac{R}{r} * ((16.9 * N^{-0.426} + 0.0387) / 100) \quad \dots (2)$$

4.2 エルボの角変形と疲労寿命

$\Delta\omega$ で整理したエルボの疲労寿命線図を図19に示す。○は文献⁵⁾に載せられたデータから $\Delta\omega$ と N の関係を求めたものである。前章の式(1)による値を図19中に△で、式(2)による値を▽で示す。

初期曲げ変形の無い場合(○および●)は線形関係にあり、▽(最適疲労曲線相当)と△(設計疲労曲線相当)の中間にある。また、初期曲げ変形が内曲げである場合(◎)は、初期曲げ変形の無い場合(○および●)よりも安全側にある。一方、初期曲げ変形が外曲げの場合(⊙)の疲労強度は、変形量に比例して低下している。

一般に、材料強度的には、30%程度までの初期ひずみ(平均ひずみ)は疲労強度に影響しないことが知られている²⁾。それに関わらず、本試験結果のように初期曲げ変形 ω_0 が疲労強度に影響しているのは、図14に示したように、エルボ断面の残留変形によって一定 ω に対するピークひずみの値(ひずみ集中係数)が変化するためである。また、3.3でも述べたように、繰返し変形にともなうひずみ挙動が変化していることも原因の一つである。

初期曲げ変形の無い場合(●および○)の $\Delta\omega$ と N との関係は、次のように表される。

$$\Delta\omega = 0.288 * N^{-0.354} \quad \dots (3)$$

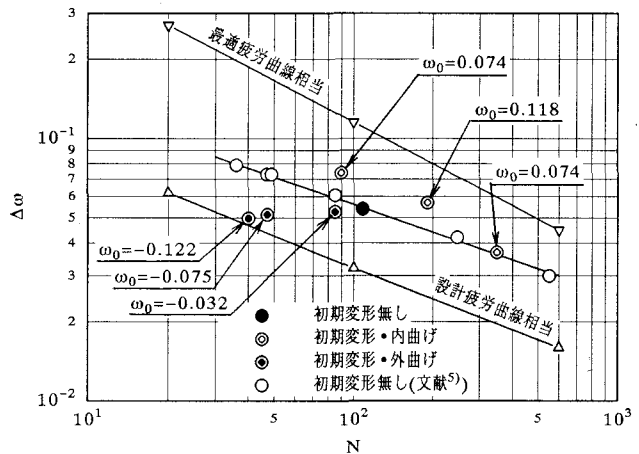


図19 初期変形の疲労強度への影響(SGP150Aロングエルボ)

4.3 初期曲げ変形の疲労強度への影響

$\Delta\omega$ を一定(約0.05)とした場合のき裂貫通寿命 N と ω_0 の関係を図20に示す。疲労強度は、初期曲げ変形が内曲げの場合には増加し、外曲げの場合には低下していることが、明確に表れている。また、 $\Delta\omega=0.05$

の場合について、初期曲げ変形のある場合の疲労寿命 N_i の、初期曲げ変形の無い場合の疲労寿命 N_o に対する比(N_i/N_o)と、 ω_o の関係を図21に示す。 ω_o が $-0.1 \sim 0.1$ の範囲で、 N_i/N_o は ω_o と直線関係にある。ただし外曲げでは ω_o が大きくなるに従って、 N_i は N_o の30～40%に低下した値に漸近する。

また図19において、式(1) (Δ)は初期曲げ変形の無い場合 ($\circ$ および $\bullet$) に対して20～30%の疲労強度となっており、ちょうど N_i が漸近していく値に近い。したがって、 ω_o が大きくなると $\bullet$ は Δ の線(式(1))付近まで低下すると考えられる。すなわち、初期曲げ変形を受けた場合にも、本来式(1)が含んでいた安全率の範囲を超えて、疲労強度が低下することはない。

3章で求めた地盤ひずみと ω の関係から、 $\omega_o=0.1$ となる外曲げの初期変形を与える一様な地盤ひずみ ε_g の大きさは、6%程度である(図7)。つまり、図7および図21から、6%程度のかかなり大きな地盤ひずみによって初期曲げ変形を受けても、疲労強度は設計疲労曲線に相当する推定式(1)までは低下しないと考えられる。

図21から、 N_i/N_o と ω_o の関係は式(4)のように、また初期曲げ変形の無い場合の N_o と $\Delta \omega$ の関係は、式(3)から、式(5)のように表される。

$$N_i/N_o = 1 + 6.4 * \omega_o \quad \dots (4)$$

$$N_o = 0.0299 * \Delta \omega^{-2.82} \quad \dots (5)$$

式(4)、(5)から N_o を消去して、 N_i を ω_o と $\Delta \omega$ で表すと、以下ようになる。

$$N_i = 0.0299 * (1 + 6.4 * \omega_o) * \Delta \omega^{-2.82} \quad \dots (6)$$

この式(6)によって、エルボの初期曲げ変形 ω_o が $-0.1 \sim 0.1$ の範囲で疲労強度 N_i を求めることができ、実用的に十分な範囲で、初期曲げ変形のある場合のエルボの疲労強度を推定できる。

5. おわりに

本研究では、静的に変位する地盤変状によって初期曲げ変形を受けた埋設曲管の疲労強度を実験的に検討し、初期変形が曲管の疲労強度に及ぼす影響を実験的に検討した。そして実管による疲労実験の結果、内曲げ初期変形を受けた曲管の疲労強度は増加するのに対し、外曲げ初期変形の場合には、疲労強度が低下することを確認した。さらに、実管による疲労実験データに基づいて、曲管の疲労強度を初期曲げ変形量と曲げ変形量振幅の関数として表し、埋設管の疲労設計に有用な実験式を提示した。この実験式は、呼び径150mmのロングエルボを対象としたもので、任意口径、任意曲率の曲管の疲労強度検討に直接適用できるものではない。しかし、本文の検討方法によって、他の口径、曲率の曲管についても同様の関係式を導くことができる。

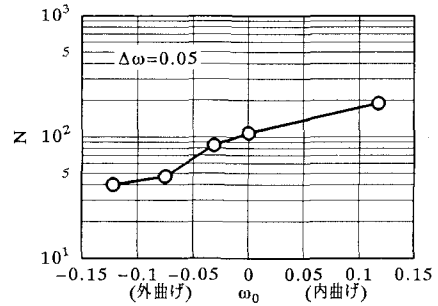


図20 初期変形と疲労寿命の関係

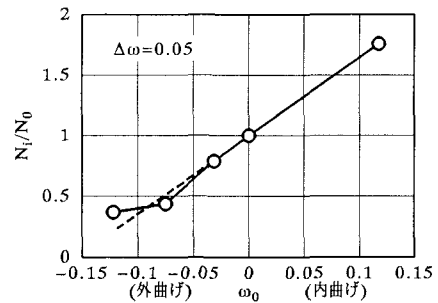


図21 初期変形の疲労強度への影響

参 考 文 献

- 1) (社)日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針, 1983.
- 2) 金澤 武, 飯田國廣：溶接継手の強度, 溶接全書17, 産報出版, 1979.
- 3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Appendices, SI-218~219, 1983.
- 4) 鵜戸口英善, 中桐 慈, 加納 巖：'薄肉彎曲管の応力と変形について', 高圧力, Vol. 6, No. 3, p. 34~42, 1968.
- 5) 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.
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Subsection NB-3680~NB-3686.5, SI-137~150, 1983.
- 7) 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, p. 1355~1364, 1990.
- 8) 鈴木, 那須, 矢野, 費：'初期曲げ変形を考慮した鋼製エルボの低サイクル疲労強度', H3年年次学術講演会講演概要集 I -p. 1246~1247, 1991.
- 9) 鈴木, 那須, 矢野：'地盤変状による初期変形を考慮した曲管の低サイクル疲労強度', 地震工学シンポジウム講演概要, p. 317~p. 320, 1991.
- 10) 鈴木, 谷村, 那須, 矢野：'初期変形を考慮した鋼製エルボの極低サイクル疲労強度', H4年年次学術講演会講演概要集 I -p. 1454~1455, 1992.

(1992年9月21日受付)