

(82) 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

NKK 応用技術研究所 ○那須 卓 鈴木信久
矢野達夫 費 中敏

1. はじめに

地盤の永久変位を始めとする地盤変状によって、埋設管は大きな変形を受けることがある。このため、埋設管材料には優れた変形性能が要求される。また一方、地震動を始めとする繰返し変形に対しては、優れた疲労強度特性も要求される。しかし埋設管の耐震強度に関する従来の研究では、変形性能か疲労強度特性の何れかに重点が置かれ、初期変形を受けた管の疲労強度特性については余り検討されていないようである。そこで本文では、埋設管の中でもひずみが集中し易い曲管を取り上げ、地盤変状などによって先行して発生した塑性変形が、それ以降発生する地震動に対する耐震強度に及ぼす影響を検討することを目的としている。

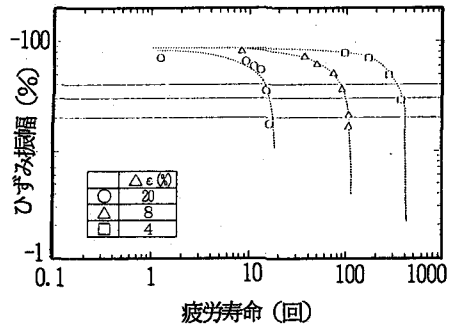


図1 残留ひずみと疲労強度の関係

2. 残留ひずみと疲労寿命

曲管が初期変形を受けている場合に問題となるのは、曲管の形状変化(断面の偏平化)の、繰返し変形時のひずみ挙動に対する影響と、残留ひずみの疲労強度への影響の2つが考えられる。このうち、鋼材の残留ひずみの大きさと疲労強度の間には、飯田らの研究¹⁾によれば、図1に示す関係がある。図1によれば、残留ひずみが30%以下では同一ひずみ振幅の鋼材の疲労強度は、明瞭には低下しない。これらのことから、本文では、最大ひずみが10%以上発生する面内の内曲げ変形を受けた鋼製エルボの、初期変形と疲労強度の関係について、実験的に検討した。

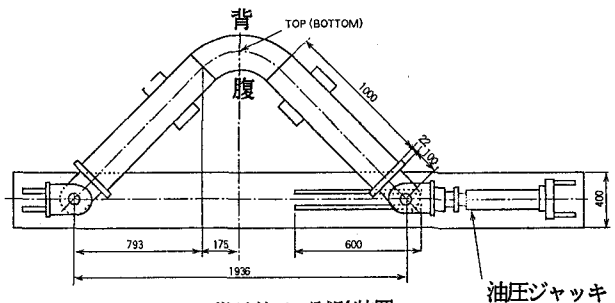


図2 供試体及び試験装置

3. 疲労実験の概要

供試体には、SGP150Aロングエルボ(配管用炭素鋼鋼管;管外径165.4mmφ,管厚5.0mm,曲げ半径248.1mmR;以下、エルボと略記)を使用し、繰返し曲げ変形に対する低サイクル疲労強度への、初期曲げ変形の影響について検討した。供試体および試験装置の形状および寸法を図2に示す。

曲管に曲げ変形が加わると、その中央断面内面にピークひずみが発生する。そこで実験に先立って、まずエルボ内面のピークひずみを有限要素解析によって求めた。実験では、まずエルボに初期変形として図3に示す内曲げ変形 d_0 を与えた後に、変位振幅 Δd を一定に保って繰返し変形を与えた。そして初期変形(d_0)は、内面のピークひずみが10~20%となるように4

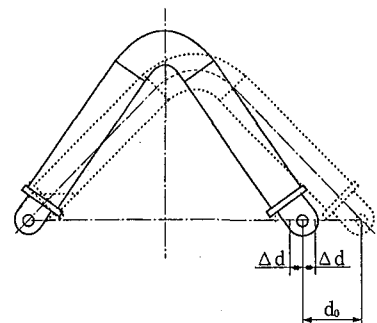


図3 初期変形と変位振幅

ケース設定した。変形設定条件を表1に示す。このうち、CASE1～CASE4については、実験および3.で述べる有限要素解析の両方を行い、CASE5,6は解析のみを行った。

表1 変形設定条件

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 $\Delta \omega$
1	110	55	0.0738	0.0347
2	110	100	0.0738	0.0650
3	175	75	0.1178	0.0477
4	0	75	0.0000	0.0497
5*	110	75	0.0738	0.0480
6*	110**	75	0.0752	0.0516

* CASE5,6は解析のみ

**CASE1～5は内曲げ、CASE6のみ外曲げ

4. 実験結果および変形解析

実験で得られた変位の繰返し数 N と最大ひずみの関係の一例を図4に示す。このように、ひずみ振幅はほぼ一定で安定しているが、平均ひずみは漸増する傾向にある。このデータを、変位と最大ひずみの関係に置き換えて図5に示す。また、同一ケースについて、解析で得られた変位と最大ひずみの関係を図6に示す。これらによって、繰返し変形過程における変位～ひずみ関係は、初期変形を与えた段階の変位～ひずみ関係とはほぼ一致していることが分かる。ここで最大ひずみの大きさが二つの図で異なるのは、実験結果は外面の測定値であるのに対して、解析結果は内面のピークひずみであるためである。

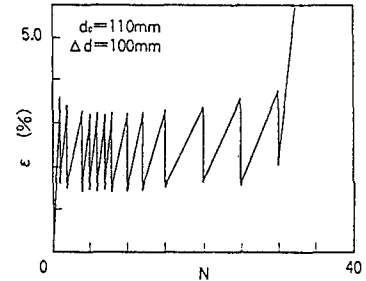


図4 繰返し変位数とひずみの関係

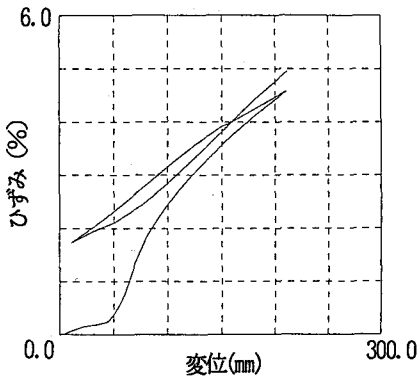


図5 変位と最大ひずみの関係 (実験値)

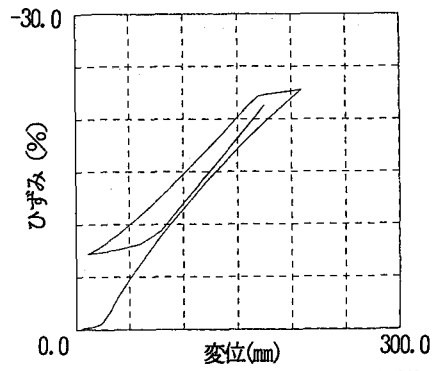


図6 変位と最大ひずみの関係 (解析値)

解析で得られた内外面のひずみ分布を図7に示す。○は実験値である。この図からわかるように内面のピークひずみの立上り方は外面よりかなり大きい。

case5,6について、内外面のひずみ分布を図8および図9に示す。内曲げの場合は背から腹への距離が縮まる偏平化、外曲げに場合はそれとは逆の変形が生じるが、ともにピークひずみはエルボの中央断面内側に発生し、内曲げの場合は外曲げの場合よりも2倍以上大きい値となっている。繰返し変位に伴うひずみ振幅が最大となる位置は、このピークひずみ発生位置近傍

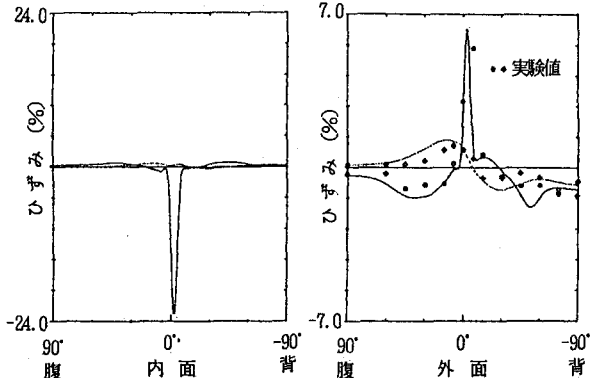


図7 エルボのひずみ分布

である。ピークひずみと同様に、ひずみ振幅の大きさも、内曲げの場合は外曲げの場合よりも2倍以上大きい。このことから、エルボの疲労強度を検討する際には、ひずみ振幅としては、解析で得られた内面のひずみ振幅を用いるのが妥当であると考えられる。

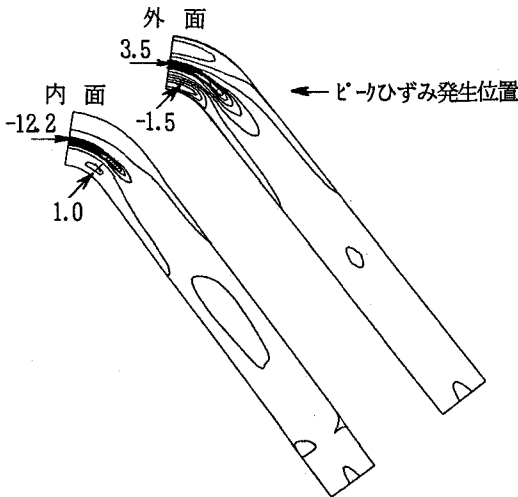


図8 エルボのピークひずみ (内曲げ)

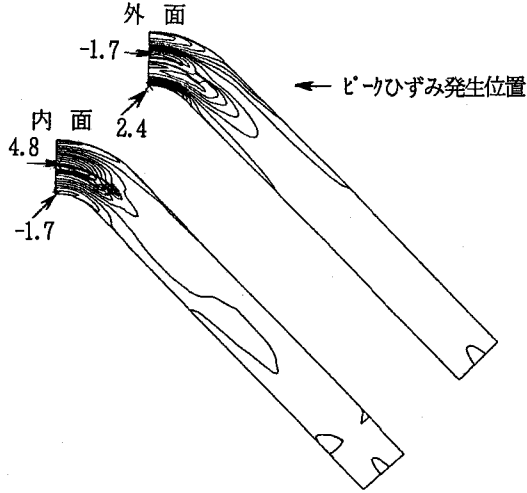


図9 エルボのピークひずみ (外曲げ)

一方、今までエルボの変形量を示すのに用いた変位量 d は、実験装置の寸法に固有なパラメータであるため、エルボの曲げ変形に関する実験結果および解析結果を一般化して表すことはできない。したがって本文では、エルボの両端における相対回転角 ($\Delta\phi$) とエルボの曲がり角度 (ϕ) から、エルボの回転率 ω ($=\Delta\phi/\phi$) を定義する。繰返し変形における、変位振幅 Δd と回転率 ω の振幅 $\Delta\omega$ は、図10に示すようにはほぼ線形関係にある。 Δd に対応する ω の振幅 $\Delta\omega$ 、および初期変形 d_0 に対応する ω_0 を、表1に解析値として示す。

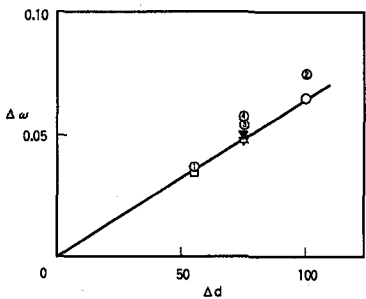


図10 $\Delta\omega$ と Δd の関係

5. 初期変形のある鋼製エルボの疲労強度

$\Delta\omega$ で整理した、エルボの疲労寿命線図を図11に示す。○が本実験で得られた結果で、●は初期変形の無いエルボについて得られた曲げ疲労強度である⁵⁾。これらの実験結果 (○および●) 全体は線形関係にあることが分かる。この疲労寿命線図から、初期曲げ変形を受けたエルボの疲労強度は、初期変形の無い場合の疲労強度と比較して、少なくとも同等以上あるものと考えられる。

このように一般的な概念に反した実験結果が得られた原因を説明するために、 $\Delta\omega$ を一定 ($\omega_0 \approx 0.05$) とした $\Delta\varepsilon \sim \omega$ の関係を図12に示す。 Δ および $\blacktriangle$ は有限要素解析で得られた管内面の最大ひずみを表し、 $\triangle$ は内曲げの場合 (CASE3~CASE5)、

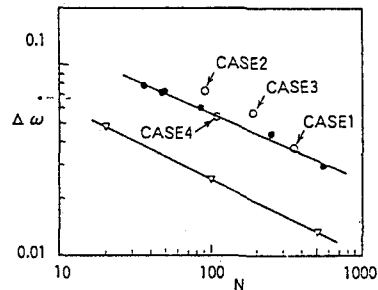


図11 エルボの疲労寿命線図

▲は外曲げの場合(CASE6)である。このように、エルボの曲げ変形(ω_0)の増加に伴って最大ひずみの振幅($\Delta \varepsilon$)は線形的に漸減しているため、初期変形が大きなエルボの方が疲労強度が大きくなるのである。また、ここで○は管表面で測定された最大ひずみをプロットしたものであるが、このように○と△の間に3~4倍もの大きな差が認められる。そのため、エルボの疲労強度を精度良く推定するためには、本来ならば3.で述べたような有限要素解析などにより、内面のピークひずみ把握しなければならないことも重要な点である。

図11で得られた $\omega \sim N$ の関係を用いれば、ピークひずみを推定して疲労寿命線図から疲労強度を推定する代わりに、曲管の回転角から疲労寿命を直接推定することができる。そうすることで、実際の設計上で曲管の詳細な解析を省略することができる。しかし、耐震設計の基準とするためには、ここで得られた $\omega \sim N$ の関係と、従来の疲労寿命線図および設計疲労曲線との間の相関が必要である。設計疲労曲線で表される ε と N の関係から求めた、 $\Delta \omega$ と疲労寿命 N の関係を式(1)⁴⁾に、式(1)による値を図11中に▽で示す。この▽で表される直線が、材料の疲労寿命線図における設計疲労曲線に相当する。

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

ここに、 R はエルボの曲率半径、 λ はパイプ係数である。

実験結果(○および●)は、設計疲労曲線(▽)よりも、同一 N に対しては ω が4~5倍大きく、また同一 ω に対しては、 N が約10倍以上の余裕がある。したがって、エルボの疲労強度は、式(1)よりも十分安全側にあることがわかる。

6. まとめ

初期変形として面内の内曲げ変形を受けた鋼製エルボの、疲労強度と初期曲げ変形量の関係を検討した。その結果、初期曲げ変形を受けたエルボの疲労強度は、少なくとも初期変形の無いエルボと同等以上であることが、実験的に明らかになった。またその理由として、同一繰返し変形に対して、初期変形が大きいほど発生するひずみ振幅が小さくなる傾向があることがわかった。

また、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評価する場合には、局所的な材料の疲労強度から考えるのではなく、エルボの回転率 ω を用いて考えられることが明らかとなった。このエルボの変形と疲労強度の関係は、鋼材の疲労寿命線図における設計疲労曲線に相当するエルボの回転角と疲労強度の関係である、式(1)で評価しても十分に安全側の評価であり、さらに ω には2倍程度は余裕を見込んでよいことが確かめられた。

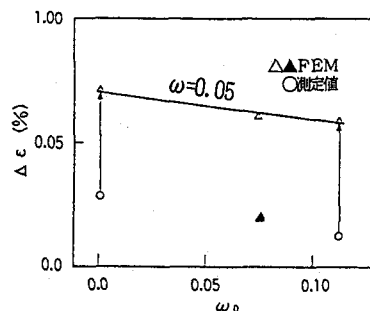


図12 初期変形とひずみ振幅の関係

参考文献

- 1) 金澤, 飯田: 溶接継手の強度, 溶接全書17, 産報出版, 1979
- 2) 浜田, 安田, 磯山, 恵本: '液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究', 土木学会論文集Ⅲ, 1986.
- 3) 鈴木, 浜田: '埋設管の地震被害と管路網の変形特性', 構造工学論文集, Vol. 37A, 1991.
- 4) 鈴木, 大場: '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, 1990.
- 5) 平瀬, 北尾, 川原, 鈴木: 'エルボの面内曲げ疲労特性', 圧力技術, Vol. 24, No. 5, 1986.
- 6) Iida, K. & Kakimi, T.: "Very Low Cycle Fatigue Strength of Ship Structure Steel," The 2nd ISPDS, 1983.