

画像計測によるコンクリート充填鋼管部材のひずみ測定

Strain Measurements on Concrete Filled Steel Tube Members by Image Analysis

舘石和雄*・村田清満**

Kazuo TATEISHI and Kiyomitsu MURATA

*工博 東京大学助教授 生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)

**工修 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

One of the main failure modes of Concrete Filled steel Tube (CFT) members is low cycle fatigue failure of the steel tube. In this study, as a fundamental study to estimate the low cycle fatigue strength of CFT members, strain measurements for the steel tube were carried out by using newly developed image analysis system which is based on the photogrammetry technique. This measuring system can be applied to the object which is three-dimensionally deformed, so that the strain field around the buckling portion in the steel tube where a crack may be formed can be measured by the system. The results of strain measurements by the system were used to calculate the fatigue damage around the buckling portion and investigate the effectiveness of the low cycle fatigue assessment for CFT members.

Key Words : Concrete Filled Steel Tube, Plastic Strain, Low Cycle Fatigue, Image Analysis

1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (CFT) 部材は、その耐力、変形性能の高さなどにより、近年土木構造物への適用が増えている¹⁾。設計指針なども整備されつつあり²⁾、今後も益々適用が増えるものと予想される。

CFT 部材の優れた力学性能は、鋼管と内部のコンクリートとの相互作用、すなわち、鋼管の拘束によってコンクリートにコンファインド効果が生じることや、逆にコンクリートによって鋼管の変形が拘束され、局部座屈発生後においてもそれが進展しにくいことなどによると考えられている。これらのメカニズムにより、一般に CFT 部材においては、鋼材に座屈が生じた後においても耐力低下が緩やかであり、ある時点で急激な耐力の低下が生じる鋼製部材、RC 部材とは大きく異なる挙動を示す。そのため終局状態を設定し難い場合もあるが、例えば終局変位の定義として、最大耐力の 90% まで耐力が低下した時点の変位などが考えられている⁴⁾。しかしこれは設計上の観点から定められたものであり、部材に生じる実際の破壊挙動に立脚して設定されたものとはいえない。CFT 部材の性能を最大限に引き出し、より合理的な設計体系を確立するためには、CFT 部材の終局破壊状態に対する詳細な検討と、その高精度な予測手法を開発する必要がある。

破壊現象の観点からみると、CFT 部材の明確な終局破壊モードの一つは鋼管の座屈部周辺に生じるき裂であると考えられる。これまでに行われた実験においても、鋼管にき裂が生じた以降から急激な耐力の低下が生じることが報告されている³⁾。鋼管に生じるき裂の発生はそのひずみ履歴と密接な関係にあるものと考

えられる。よってき裂の発生挙動について検討するためには、鋼材に生じるひずみ履歴について詳細に明らかにしておく必要がある。しかし従来の研究においては、荷重-変位関係によって試験結果が整理されているものがほとんどであり、鋼管に生じるひずみ挙動に着目した研究はほとんどない。また、土木構造物部材に生じる低サイクル疲労に着目した研究は、鋼製橋脚隅角部などを対象に行われている⁵⁾程度であり、未だ十分な研究の蓄積はなされていない。

そこで本研究では、新たに開発した画像計測によるひずみ測定システムを CFT 部材の繰返し交番載荷試験に適用することにより、き裂発生部、すなわち、座屈部周辺のひずみに関する詳細な計測を行い、その特徴を明らかにする。本計測システムは非接触でのひずみ測定を可能とするものであり、ひずみゲージによる測定よりも大きなひずみも測定できることや、広範囲なひずみ分布を一度に測定できるなどの利点を有している。このシステムによって測定したひずみ分布やひずみ履歴などから、CFT 部材の鋼管に生じる疲労損傷度を求め、それを過去に得られている寿命曲線と比較することにより、き裂発生条件について基礎的な検討を行った。

2. ひずみ計測手法

2.1 計測理論

本研究で用いたひずみ計測システムは写真測量の技術を応用したものであり、2台のデジタルカメラによって撮影されたステレオ画像を処理することによって対

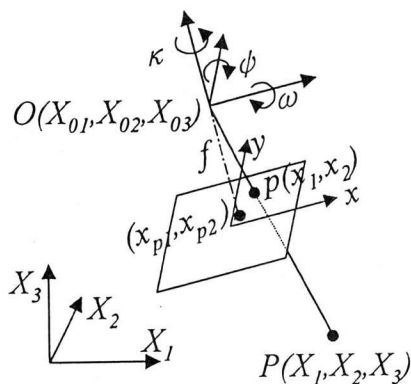


図-1 座標系

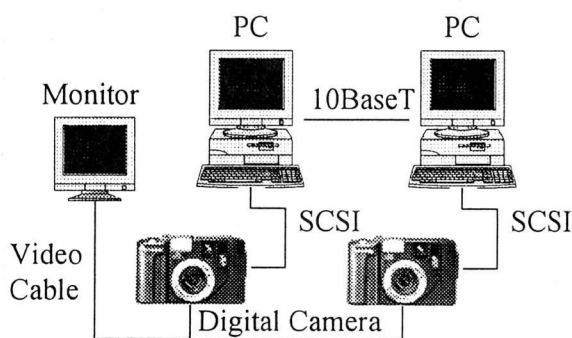


図-2 画像計測システム

象領域の変位を計測し、それによりひずみを算出するものである⁶⁾。以下に計測理論の概要を示す。

本システムでは内部標定要素として、写真中心と主点のずれ、画面距離、レンズディストーションを考慮しており、この場合、図-1に示す対象点Pの地上座標 (X_1, X_2, X_3) と、それを撮影した写真上での座標(写真座標) (x_1, x_2) との間には次の関係がある⁷⁾。

$$x_1 = -f \frac{a_{11}(X_1 - X_{01}) + a_{12}(X_2 - X_{02}) + a_{13}(X_3 - X_{03})}{a_{31}(X_1 - X_{01}) + a_{32}(X_2 - X_{02}) + a_{33}(X_3 - X_{03})} + x_{p1} - \bar{x}_1(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (1a)$$

$$x_2 = -f \frac{a_{21}(X_1 - X_{01}) + a_{22}(X_2 - X_{02}) + a_{23}(X_3 - X_{03})}{a_{31}(X_1 - X_{01}) + a_{32}(X_2 - X_{02}) + a_{33}(X_3 - X_{03})} + x_{p2} - \bar{x}_2(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (1b)$$

ここに、 (X_{01}, X_{02}, X_{03}) :投影中心、 f :画面距離(焦点距離)、 a_{ij} : ω, ϕ, κ からなる回転行列、 ω, ϕ, κ : X_1, X_2, X_3 軸まわりの回転角、 x_{p1}, x_{p2} :主点のずれ、 k_1, k_2 :ディストーション補正のための係数、 $\bar{x}_1 = x_1 - x_{p1}$ 、 $\bar{x}_2 = x_2 - x_{p2}$ 、 $r^2 = \bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2$ である。

計測に先立って、座標が既知の標点を配置したテストパターンを撮影し、その画像から得られた写真座標を用いて (X_{01}, X_{02}, X_{03}) および (ω, ϕ, κ) の6つの外部標定要素と、 $(x_{p1}, x_{p2}), f, (k_1, k_2)$ の5つの内部標定要素を定める。上記の標定要素は2台のカメラそれぞれについて定めておく。求められた標定要素を用い、(1)式の関係を逆に利用することにより、最小二乗法によって測定対象点の3次元座標 (X_1, X_2, X_3) を求めることができる。

標点 m の変形前後の座標がわかれば、その変位ベクトル $u_i^{(m)}$ は容易に計算することができる。ここでは隣接する 3×3 個の標点で構成される領域を考え、そこでの変位場が次式のように変形前の座標値の2次関数で近似できるとする。

$$u_i = a + \sum_{j=1}^3 b_j X_j + \sum_{j=1}^3 c_j X_j^2 \quad (i = 1, 3) \quad (2)$$

a, b_j, c_j は未定係数であり、9個の標点に対して求められている変位ベクトル $u_i^{(m)}$ を用いて最小二乗法により定める。変位場の近似式が求められれば、Lagrangeの

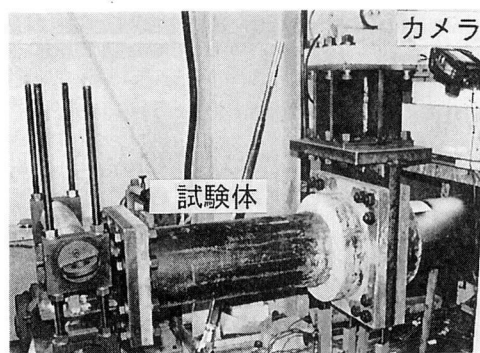


図-3 計測状況

ひずみテンソルは次式によって計算することができる。

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_\alpha}{\partial X_i} \frac{\partial u_\alpha}{\partial X_j} \right] \quad (3)$$

また、 X_i 軸に平行な線素の伸びひずみ E_i は

$$E_i = \sqrt{1 + 2E_{ii}} - 1 \quad (\text{和をとらない}) \quad (4)$$

となる。

2.2 計測システム

図-2に実際に用いた画像計測システムを示す。用いたカメラは有効画素数 1280×1000 の一般撮影用デジタルカメラである。このカメラ2台を適当な間隔を開けて配置し、随時試験体を撮影する。デジタルカメラはパーソナルコンピュータにSCSIインターフェースを通じてオンライン接続されており、高速なデータ転送が可能となっている。また、撮影モードの設定やレリーズ操作など一連の撮影作業をパーソナルコンピュータ側から制御することができる。計測状況を図-3に示す。

3. 試験体および载荷方法

試験体の全体図を図-4に示す。試験体に用いた鋼管はSTK400の円形断面鋼管であり、その機械的性質・化学成分は表-1のとおりである。また、コンクリート

表-1 鋼材の機械的性質・化学成分

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
STK400	373	451	28	0.11	0.10	0.48	0.021	0.005

表-2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位体積重量(kg/m^3)				スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G		
20	60	50	195	325	907	921	6.0	2

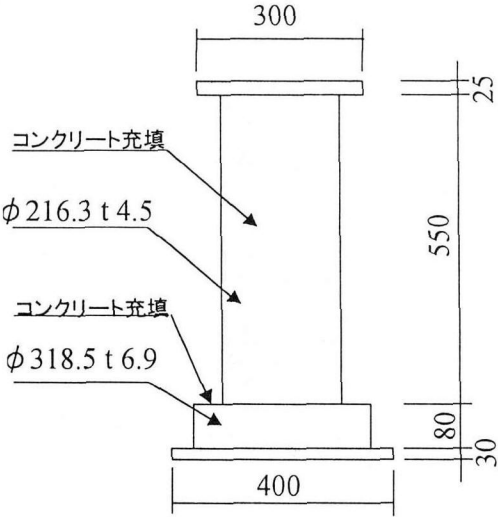


図-4 試験体

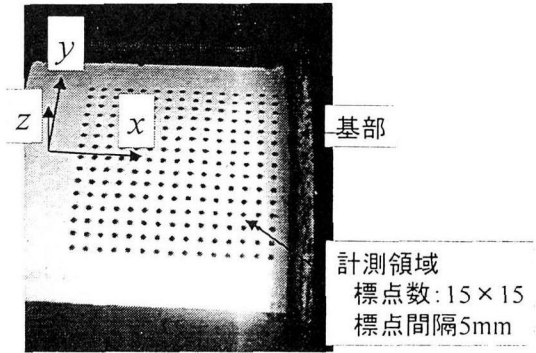


図-6 ひずみ計測領域と標点

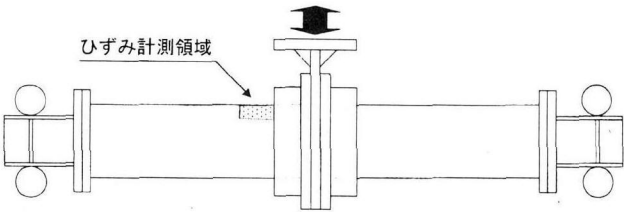


図-5 荷重方法

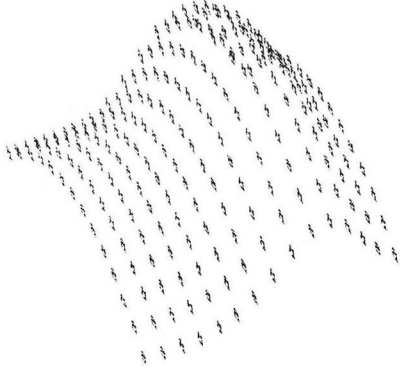


図-7 計測された変形状の例

の配合は表-2のとおりであり、荷重試験日におけるコンクリートの圧縮強度は37MPaであった。コンクリートは試験体を立てた状態で上部の蓋板にけられた孔から打設した。蓋板の直下に残される空隙部には無収縮モルタルを注入し、管内のすべての空間を満たすようにした。

試験体は図-5に示すように2体ずつ高力ボルトで接続して梁状にし、中央にて正負交番荷重を行った。ただし軸力は導入していない。

試験体の上面には図-6に示すように、市販されているペンキを用いて約5mm間隔で15個×15個の標点

を描き、この領域をひずみ計測範囲とした。

荷重パターンは、降伏変位を基準にそれを整数倍して漸増させるもの（繰り返し回数3回）と、一定の変位振幅を繰り返すものの2通りとした。いずれのケースでも、試験体上面（ひずみ測定領域側）が圧縮ひずみを受ける方向から荷重を開始した。

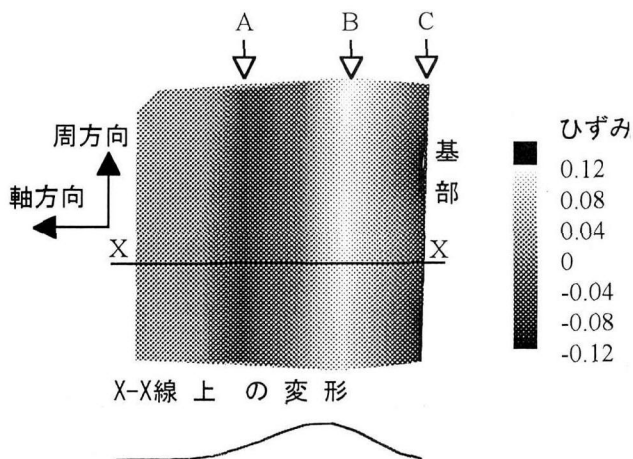


図-8 ひずみ分布

4. ひずみ測定精度の検証

本システムによるひずみ計測の精度を検証するため、あらかじめ同一形状の試験体を用いて予備試験を行った。予備試験体には基部から30mm上方の位置にひずみゲージを貼り付け、その上から先に示したようにペンキにより標点を描いた。

鋼管に明らかに座屈が生じている状態を例にとり、画像計測によって求めた変形状態を図-7に示す。基部に生じた座屈変形状がよく再現されている。また図-8にそのときの部材軸方向ひずみ分布を示す。B点では大きな引張ひずみが、その反対にA点およびC点では大きな圧縮ひずみが発生していることがわかる。また、管周方向にわたってのひずみの差は小さい。なお、本研究では、以下、A点を座屈上側裾部、B点を座屈頂部、C点を座屈下側裾部と称することとする。

画像計測によってひずみゲージ近傍にある標点のひずみを求め、それとひずみゲージによる計測値を比較した結果を図-9に示す。画像計測による結果とひずみゲージによる計測結果とはほぼ一致している。6 δ 付近では試験体には座屈が発生していたが、その時点においても両者が一致していることより、座屈が生じるような大きな変形領域においても本計測システムによって精度よくひずみが計測可能であることが確認された。なお、これ以上の荷重を行ったところ、ゲージが剥離するとともに、その上の標点のペイントも剥がれ落ち、ともに計測が不可能となった。

以上のように本システムは妥当な計測結果を与えており、座屈のような3次元的な変形を対象に、かつ広範囲の領域のひずみの計測を一度に行うことができるという特徴を持っている。

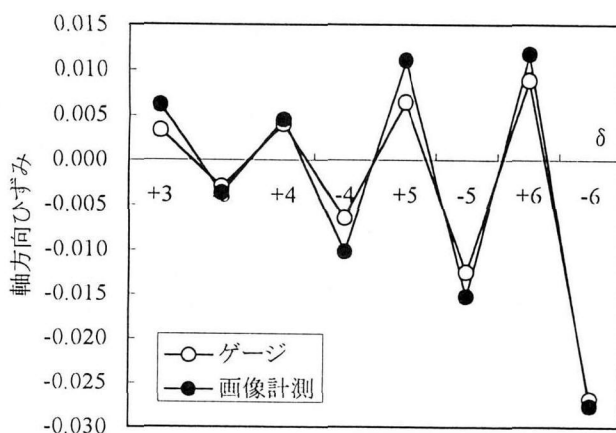


図-9 ひずみ測定結果の比較

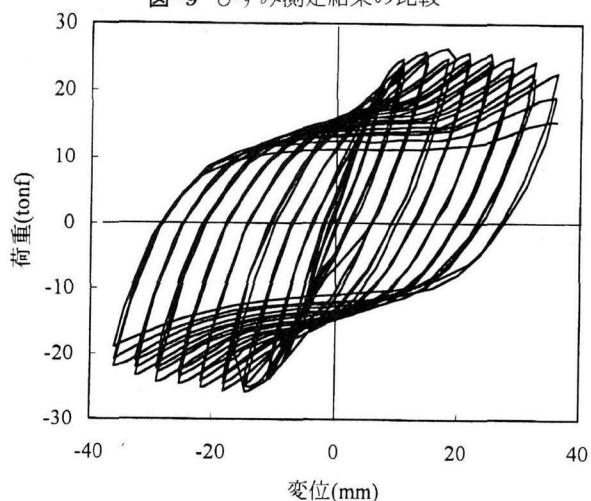


図-10 荷重－変位関係（漸増変位荷重）

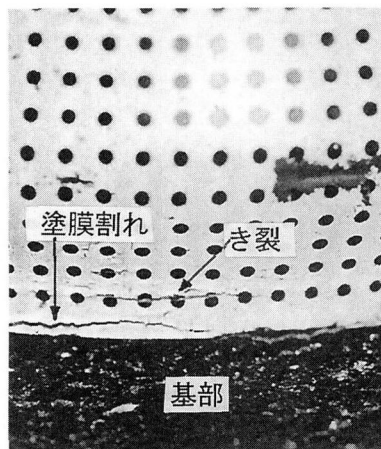


図-11 試験体に生じたき裂（漸増変位荷重）

5. 試験結果

5.1 荷重－変位関係および最終破壊モード

漸増変位荷重を行った場合の荷重－変位関係を図-10に示す。なお、降伏変位 δ_y は試験体の最外縁に貼ったひずみゲージの値によって定め、3.6mmとした。漸増変位荷重の場合、変位18mm (5 δ_y) で最大耐力をと

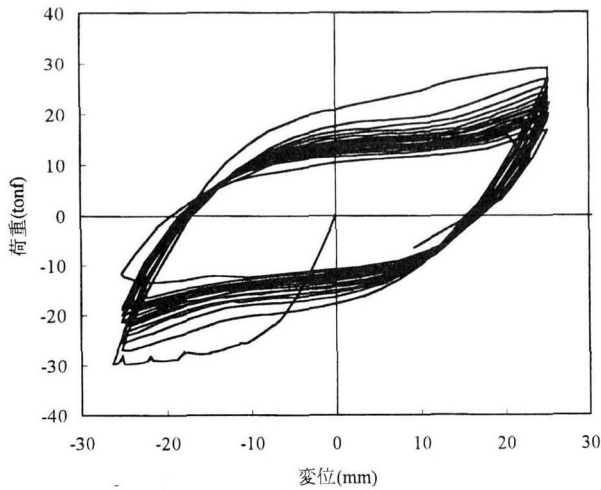


図-12 荷重-変位関係 (一定変位載荷)

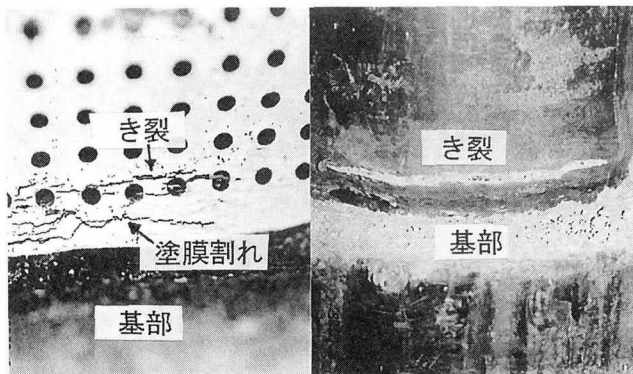


図-13 試験体に生じたき裂 (一定変位載荷)

り、その後荷重の繰返しとともに徐々に耐力が低下している。しかし、その低下の程度は比較的緩く、安定した履歴ループとなっている。変位25.2mm ($7\delta_y$) 載荷時に、ひずみ測定領域の基部から5mm程度上方の位置にき裂の発生が確認された。このき裂は繰返しとともに進展し、 $10\delta_y$ 載荷時に急激に耐力が低下した。試験体の最終状態を図-11に示す。

一定変位載荷を行った場合の荷重-変位関係を図-12に示す。繰返す変位振幅は漸増変位載荷でき裂が確認された $\pm 25.2\text{mm}$ ($7\delta_y$) とした。一回目の載荷時には漸増変位載荷時に最大耐力となった18mmの変位を越えても耐力は上昇し続けたが、2回目以降は荷重の繰返しとともに徐々に耐力が低下した。7回目の繰返し時に、漸増変位載荷の場合と同様に、ひずみ測定領域の基部から約5mm上方の位置にき裂が発見された。このき裂はその後の変位の繰返しによってもそれほど早い進展はみせなかった。16回目の繰返し時において、ひずみ計測領域と反対面 (下面) の座屈頂部に大きなき裂が発生し、これにより急激に耐力が低下したため、試験を終了した。上面 (測定領域側) に生じた進展の遅いき裂、およびその反対面に発生した座

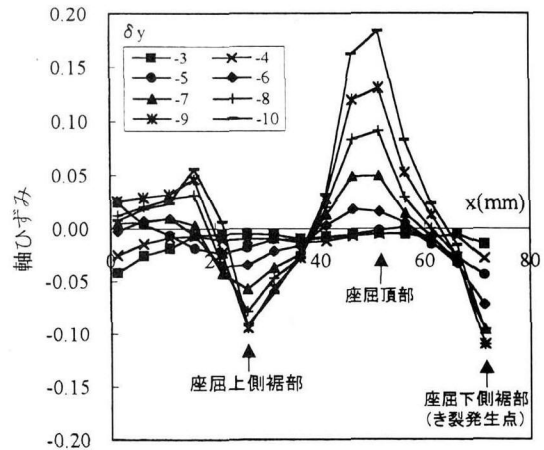


図-14 圧縮変位ピーク時の軸方向ひずみ分布

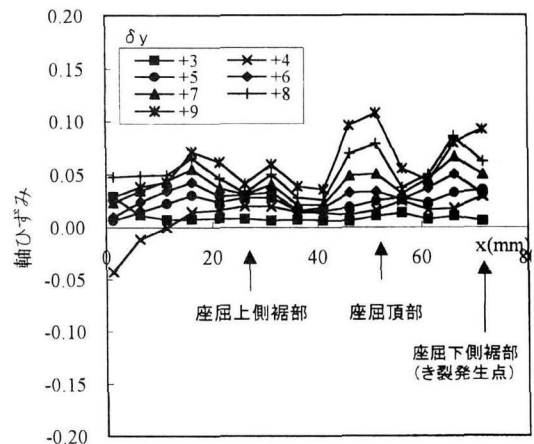


図-15 引張変位ピーク時の軸方向ひずみ分布

屈頂部のき裂を図-13に示す。

5.2 漸増変位載荷時のひずみ挙動

図-14に各変位段階の圧縮変位ピーク時 ($-3\delta_y, -4\delta_y, -5\delta_y, \dots, -10\delta_y$ 載荷時) の軸方向ひずみ分布の変化を示す。横軸の x は図-6に示すように試験体表面に設けた便宜的な座標軸であり、原点の位置に特に意味はない。また、同一変位は3回ずつ繰返したが、その間のひずみの変化は比較的小さかったため、各変位載荷時のうち1つの計測値のみを示している。

座屈頂部では変位の増加に伴って引張ひずみが増加しているのに対し、裾部では圧縮ひずみが増加しており、位置によって大きなひずみの差が生じていることがわかる。一方、図-15は各変位段階の引張変位ピーク時 ($+3\delta_y, +4\delta_y, +5\delta_y, \dots, +10\delta_y$ 載荷時) のひずみ分布を示したものである。引張変位ピーク時には、圧縮時と比較して位置によるひずみの差は小さくなっているが、座屈頂部および基部付近では変位の増加とともに徐々に引張ひずみが増大している。

これらの図より最もひずみが大きな3点 (図中に矢印で示した点) を抽出し、各変位段階ごとのひずみ

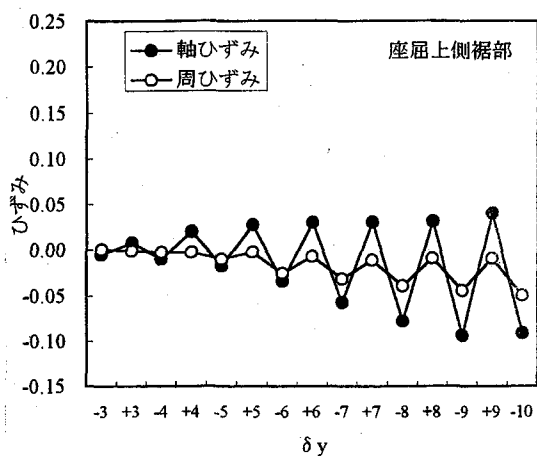


図-16-a 座屈上側裾部

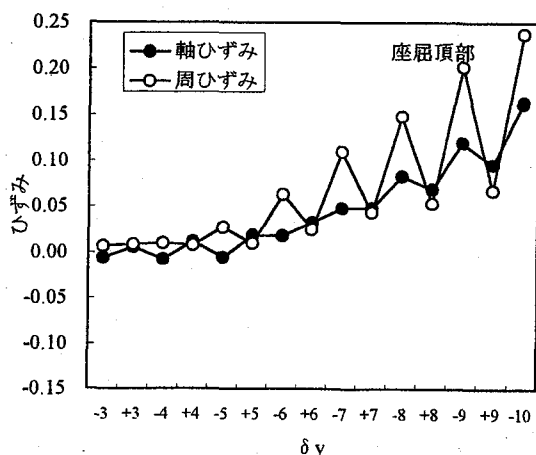


図-16-b 座屈頂部

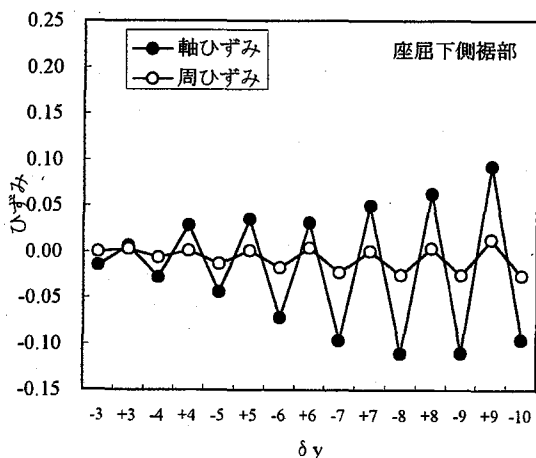


図-16-c 座屈下側裾部

図-16 荷重ごとのひずみ変動

の変動を示したものが図-16である。座屈頂部における部材軸方向ひずみは荷重変位が大きくなるほど引張側にシフトしており、最終的には10%を超える大きなひずみが発生していることがわかる。ただし変位の交番によるひずみの変動は小さい。周方向ひずみは変位の増大とともに引張側にシフトし、かつひずみ振幅も徐々に大きくなっている。その変動幅は座屈裾部での

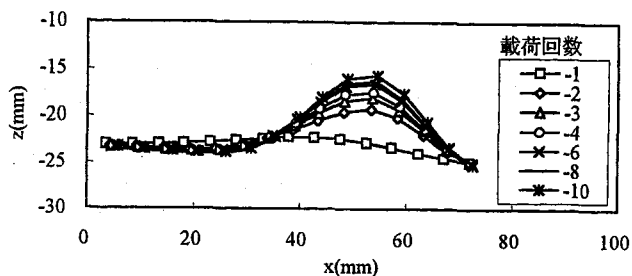


図-17 変形形状

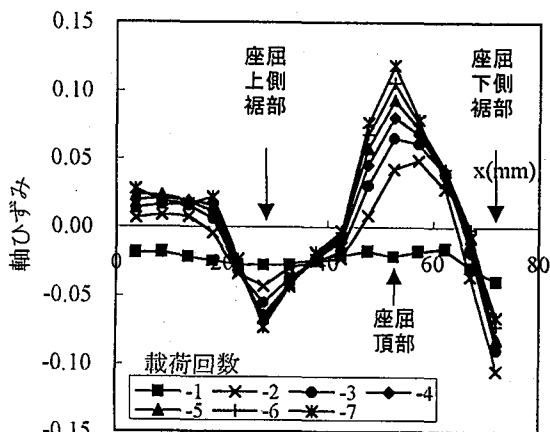


図-18 圧縮変位ピーク時の軸方向ひずみ分布

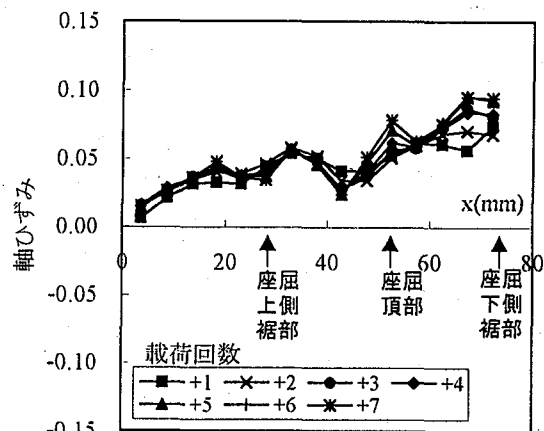


図-19 引張変位ピーク時の軸方向ひずみ分布

軸方向ひずみの変動幅とほぼ同等の大きさである。両裾部の部材軸方向ひずみは似たような変化を示しており、正負交番荷重に伴って非常に大きなひずみ変動が生じている。特に、基部に近い座屈下側裾部でのひずみ振幅が最も大きく、これはこの位置においてき裂が発生した現象と一致している。また、管周方向ひずみの変動および絶対値は比較的小さい。

5.3 一定変位荷重時のひずみ挙動

図-17に、代表的な荷重繰返し時における鋼管表面の変形形状を示す。図中の縦軸および横軸は図-6に示すようにとっている。1回目の荷重時には多少座屈変

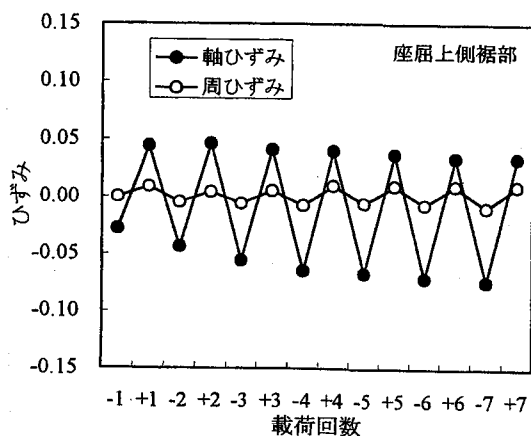


図-20-a 座屈上側裾部

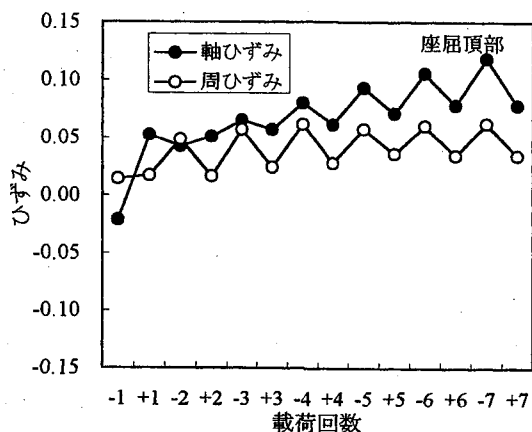


図-20-b 座屈頂部

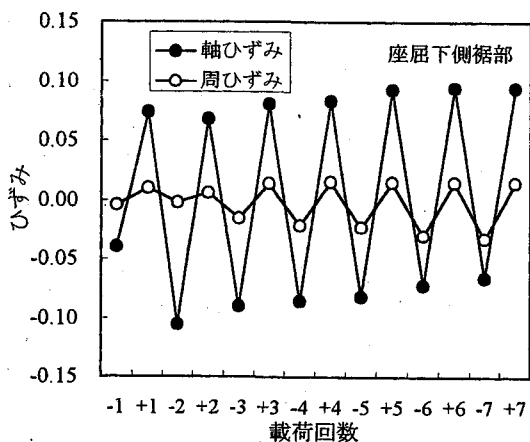


図-20-c 座屈下側裾部

図-20 载荷ごとのひずみ変動

形が見られるもののその程度は小さい。2回目の载荷以降には明らかな座屈変形が生じており、载荷繰返しに伴って徐々に大きくなっていることがわかる。

図-18に、変位繰返しごとの圧縮変位ピーク時の軸ひずみ分布を示す。一定変位の繰返し载荷を行ったが、座屈の頂部では変位の繰返しにともなって引張ひずみが、裾部では圧縮ひずみが増加していくようすがわか

る。図-19は引張変位ピーク時におけるひずみ分布を示したものである。引張変位ピーク時には、繰返しに伴うひずみの増加は小さい。

先ほどと同じように、この分布からひずみが大きい3点を抽出し、そこでのひずみ履歴を示したものを図-20に示す。漸増変位载荷の場合と同様に、座屈頂部においては軸方向ひずみは単調に引張側にシフトしていくがその振幅は比較的小さい。管周方向ひずみについてもその変動は小さいが、平均値としては軸方向ひずみの半分程度の大きさとなっている。座屈上側裾部の軸方向ひずみは载荷回数にともなってやや圧縮側にシフトしているが、一貫して安定したひずみ変動となっている。座屈下側裾部の軸方向ひずみについては、2回目の载荷以降は全体的に若干引張側にシフトしており、その変動は他の位置のものと比較して大きくなっている。裾部においては、管周方向のひずみの絶対値は小さく、また変動も軸ひずみに比べて非常に小さい。

いずれの位置においても、1回目の载荷時とそれ以降の载荷時では発生するひずみの傾向が異なっている。これは内部のコンクリートによる圧縮力の分担が1回目の载荷時とそれ以降（1回目の引張を受けた以降）で異なるためであると考えられる。

6. 低サイクル疲労強度の検討

漸増変位载荷、一定変位载荷とも、ともに座屈下側裾部にき裂が発生した。そこで、同位置において測定されたひずみ履歴を基に低サイクル疲労強度についての検討を行った。

き裂発生位置でのひずみの測定結果から次式によって塑性ひずみ振幅を求める。

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_{ep} - \Delta \varepsilon_e \quad (5)$$

ここに $\Delta \varepsilon_{ep}$ は全ひずみ振幅、 $\Delta \varepsilon_e$ は弾性ひずみ振幅（いずれも対数ひずみ）である。全ひずみ振幅は計測されたひずみ変動の極大値と極小値の差から計算することができる。しかし弾性ひずみ振幅については、本実験では応力が測定できていないため正確に求めることは不可能である。そこで、鋼材の材料試験値から得られた降伏強度を用い、完全弾塑性の応力-ひずみ関係を仮定して弾性ひずみ振幅を計算した。これは実際の挙動とは異なるが、全ひずみ振幅に占める弾性ひずみ振幅の割合は小さいことから、その影響はほとんどないことを確認している。

個々の塑性ひずみ振幅は線形被害則によって累積し、次式によって等価塑性ひずみ振幅を計算した。

$$\Delta \varepsilon_{p,eq} = \frac{\sum \Delta \varepsilon_{p,i} \cdot n_i^{k_p}}{N^{k_p}} \quad (6)$$

$$N = \sum n_i \quad (7)$$

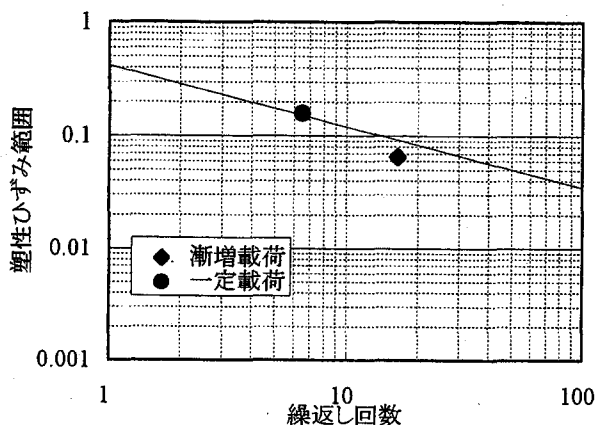


図-21 き裂発生寿命と塑性ひずみ振幅の関係

ここで k_p は400MPa級の構造用鋼材について砂時計試験片を用いて求められた低サイクル疲労寿命曲線⁸⁾,

$$\Delta \varepsilon_p \cdot N_f^{0.54} = 0.42 \quad (8)$$

より0.54とした。

図-21に、本実験により得られたき裂発生寿命と等価塑性ひずみ振幅との関係を示す。図中の実線は式(8)に示す寿命曲線である。数少ないデータであるが、両データとも寿命曲線の近傍にプロットされており、このようなアプローチによって低サイクル疲労強度が評価できる可能性があることがわかる。

なお、一定変位载荷においては、ひずみ測定領域面とは反対面の座屈頂部に大きなき裂が発生した。このき裂については発生時期が不明確なこと、発生位置近傍のひずみを測定していなかったことより上記の検討は行っていない。参考までにひずみ測定領域面(き裂と反対側の面)における測定結果に着目すると、座屈頂部では载荷に伴うひずみ振幅は小さく、このき裂の発生は説明できない。詳細は不明であるが、ひずみ測定領域では1回目の载荷で圧縮を受けるのに対し、き裂が発生した面では引張を受けることから、両者でひずみ履歴が異なっている可能性がある。また、座屈頂部には軸方向だけではなく管周方向にも大きなひずみが生じていたことから、それが疲労強度に影響を与えたことも考えられる。初期载荷で引張を受ける場合と圧縮を受ける場合とのひずみ挙動の差や、ひずみに高い多軸性がある場合の低サイクル疲労強度などについて今後検討する必要があるものと考えられる。

7. まとめ

CFTの破壊モードの一つである鋼管の低サイクル疲労に関する基礎的検討として、鋼管のひずみ挙動の実測を行った。ひずみの実測には、新たに開発した画像計測システムを利用した。本システムは座屈のような3次元的な変形を対象に、かつ広い範囲の領域のひ

ずみの計測を一度に行うことができるという画期的な特徴を持っている。本システムにより、過去には得ることのできなかった極めて詳細な鋼管の変形、ひずみ挙動を明らかにすることができた。さらに、本システムにて計測したひずみ履歴から、鋼管の低サイクル疲労強度の照査を行うことにより、その有効性を示した。

本システムによりCFT部材のひずみを精度よく計測することが可能となったことから、様々な部材諸元や载荷パラメータとひずみ履歴との関係を明らかにすることによって、CFTにおける低サイクル疲労の発生条件などを明らかにすることができると考えられる。

謝辞: 試験体の製作にあたり、東京大学生産技術研究所魚本研究室、同試作工場の皆様にご協力いただきました。また、査読者の皆様には大変貴重なご意見を賜りました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 村田清満: 複合構造物の鉄道構造物への適用, 鉄道総研報告, Vol.11, No.12, pp.1-4, 1997.
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善, 1998.
- 3) 村田清満, 渡辺忠男, 西川佳祐, 木下雅敬: 軸力と曲げを受けるコンクリート充填鋼管柱の耐力, 変形特性, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集I-A, pp.222-223, 1995.
- 4) 村田清満, 安原真人, 渡辺忠男, 木下雅敬: コンクリート充填円形鋼管柱の耐荷力と変形性能の評価, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1555-1564, 1998.
- 5) 坂野昌弘, 三上市蔵, 鷹羽新二: 鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動, 土木学会論文集, No.563/I-39, 1997.
- 6) 館石和雄, 荒木昭俊: 写真測量を用いた鋼材座屈部のひずみ計測, 土木学会第53回年次学術講演会概要集I-A, pp.260-261, 1998.
- 7) 村井俊治, 奥田勉, 中村秀至: 非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.29, No.6, pp.1-15, 1981.
- 8) 西村俊夫, 三木千寿: 構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性, 土木学会論文報告集, No.279, pp.29-44, 1978.

(1998年9月18日受付)