

論文 CFT 部材の鋼管のひずみ挙動に関する研究

齋藤 智也*¹・館石 和雄*²

要旨：コンクリート充填鋼管柱（CFT 柱）の破壊モードの一つとして、鋼管座屈部におけるき裂の発生が挙げられるため、与えられた CFT 柱の諸元と荷重条件より、き裂発生時期を求めることができれば、合理的な設計のために役立つと考えられる。本研究では、鋼管座屈部のひずみを画像計測より求め、その累積疲労損傷度によってき裂の発生時期を予測する手法について検討した。特に、鋼管の径厚比に着目し、その影響について明らかにした。

キーワード：コンクリート充填鋼管、ひずみ、座屈、き裂、低サイクル疲労、画像計測

1. はじめに

コンクリート充填鋼管柱（CFT 柱）は、コンクリートと鋼管の相互拘束効果により、大きな靱性を有することが知られている。

CFT 柱に地震荷重を想定した大きな変位を与えると、鋼管基部に座屈が生じ、これが徐々に大きくなって行くが、柱としての耐力低下は緩やかであり、座屈が大きくなった後、座屈部周辺にき裂が生じると、柱の耐力が急激に低下するという実験結果が多く報告されている¹⁾。このため、CFT 柱の終局破壊モードの一つとして、き裂の発生を挙げる事ができるので、き裂の発生時期を予測する手法の開発が必要である。鋼管に生じるき裂の発生はそのひずみ挙動と密接に関係すると考えられるが、き裂の発生する座屈部周辺のひずみは座屈変形が大きくなるとひずみゲージが剥がれてしまうために測定不可能であった。

そこで著者の一人は、CFT 柱の座屈部におけるひずみを画像計測を用いた方法により計測し、さらに、これから得られたひずみ履歴より、鋼材の低サイクル疲労強度を照査して導かれたき裂発生時期が、実験でのき裂発生時期と一致することを確かめた²⁾。この研究成果は、座屈周辺部のひずみ履歴を知る事ができれば、CFT 柱のき裂発生時期を予測できる可能性を示している。この研究は一種類の径厚比でのみ、軸力無しという荷重条件

で行われたため、今後、さらに様々な諸元の試験体について上記の予測が可能であるかを明らかにする必要がある。

本研究では、ひずみ挙動とき裂発生時期の関係を把握することを目的としている。CFT 柱の破壊に関しては、径厚比、軸力比、鋼材強度、コンクリート強度など種々の因子が影響を与えられられるが、本研究ではその一つとして径厚比の影響について検討した。

2. 実験概要

試験体の全体図を図-1 に示す。この2体の試験体は、形状は同一であり、鋼管厚のみ変化させている。鋼管厚が4.5mm（径厚比59.3）のものを試験体1、6.6mm（径厚比40.5）のものを試験体2とする。試験体諸元を表-1 に示す。鋼管内部へのコンクリートの打設は、鋼管上部の直径10cmの穴より行い、打設後コンクリートの収縮により生じた空隙は無収縮モルタルで充填し、鋼管とコンクリートの一体性を保つようにした。コンクリートの配合は二つの試験体で同一であり、それを表-2 に示す。

次に、荷重方法であるが、二つの試験体でそれぞれ、降伏軸力の10%の一定軸力をかけながら、静的に水平交番荷重試験を行った。実験状況を図-2 に示す。交番荷重は変位制御で行い、

*1 特許庁 (正会員)

*2 名古屋大学工学部 助教授 (正会員)

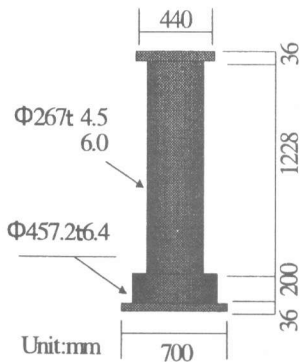


図 - 1 試験体の全体図

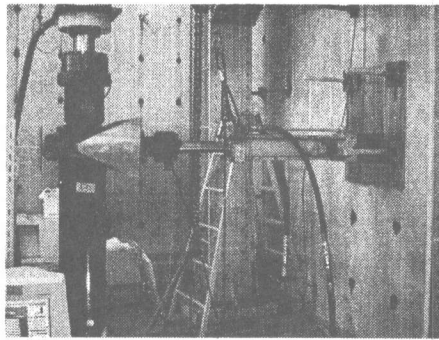


図 - 2 実験状況

表-1 試験体諸元

	材質	降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	伸び(%)	コンクリート強度(MPa)	軸力(tf)
試験体1	SS400	342.7	448.3	37.5	38.9	30.71
試験体2	STK400	372.3	452.3	39.1	42.7	39.34

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

荷重により引張が生じる側の最外縁から 45° 位置に付けたひずみゲージが鋼管の降伏ひずみに達した時の変位を降伏変位 δ_y と定め、以後、順次この δ_y を整数倍した変位が生じるように荷重した。各荷重段階の繰り返し回数は3回とした。

3. 荷重変位関係

試験体1の荷重における荷重 - 変位関係を図 - 3 に示す。この試験では、ひずみゲージより求まる降伏変位は 17.6mm であった。終局破壊モードはき裂の発生で、 $5\delta_y$ の1回目の荷重時に発生し、その後すぐに、荷重が急激に低下したために試験を終了した。き裂発生位置は、試験体のちょうど基部のところである。このき裂の写真を図 - 4 に示す。

試験体2については、降伏変位は 22.6mm であったが、使用した水平方向ジャッキの加力性能不足により、片側(最初に変形させた方向)への変位は常に δ_y にとどめた。試験体1についての荷重 - 変位曲線を図 - 5 に示す。この試験では、 $7\delta_y$ 3回目の荷重終了時に、屈座頂部にき裂が生じ、この後き裂が大きくなるとともに、急激に荷重が低下したので試験を終えた。き裂の写真を図 - 6 に示す。

4. ひずみ計測方法

4. 1 ひずみ計測システム

画像計測によるひずみ計測システムを図 - 7 に示す。試験体のひずみ計測領域には、図 - 8 に示すようにペンキで多数の点がマーキングされており、各荷重段階において2台のカメラで撮影した画像を解析し、これらの点の座標を算出することで、その時の計測面の変形形状が求められる。それをもとに各位置のひずみを計算することができる。試験体の最初に引張を加える側を有効画素数 1280×1000 のデジタルカメラ2台で、反対側の最初に圧縮を加える面は有効画素数 1135×485 のカメラを2台使い、試験体両面のひずみを計測した。

4. 2 ひずみ計測の原理

空間にある座標系が定義されている時、その中にあるカメラの位置は、投影中心 (X_0, Y_0, Z_0) カメラ軸の回転角 (ω, ϕ, κ) という6つの外部標定要素より決定される。それに加え、写真中心と主点のずれ (x_{p1}, y_{p1}) 、焦点距離 f 、レンズのディストーションを補正するための係数 (k_1, k_2) という5つの内部評定要素を考慮したため、カメラの位置、及び特性は 11 個の変数

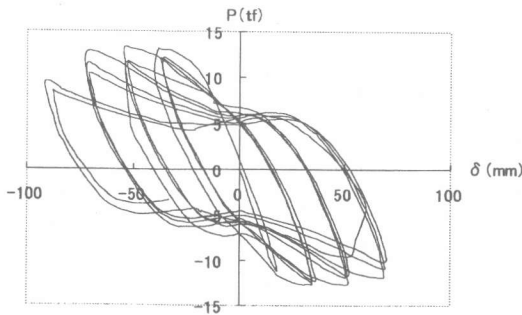


図-3 試験体1の荷重変位曲線

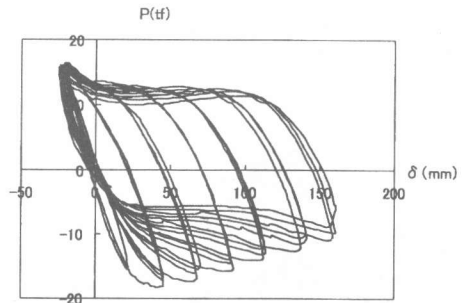


図-5 試験体2の荷重-変位曲線

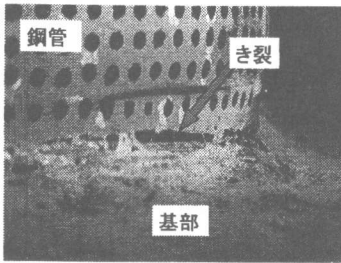


図-4 試験体1に生じたき裂

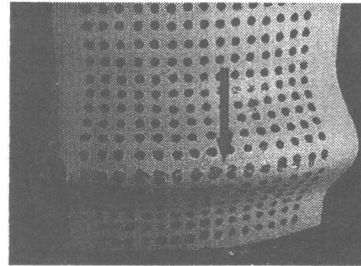


図-6 試験体2に生じたき裂

より決定されることになる。(図-9参照。)

このカメラで (X_n, Y_n, Z_n) にある点を撮影し、その写真におけるこの点の座標が (x_n, y_n) である時、これらの変数には以下の関係がある。

$$x_n = -f \frac{a_{11}(X_n - X_0) + a_{12}(Y_n - Y_0) + a_{13}(Z_n - Z_0)}{a_{31}(X_n - X_0) + a_{32}(Y_n - Y_0) + a_{33}(Z_n - Z_0)} + x_{p1} - x^{-1}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (1)$$

$$y_n = -f \frac{a_{21}(X_n - X_0) + a_{22}(Y_n - Y_0) + a_{23}(Z_n - Z_0)}{a_{31}(X_n - X_0) + a_{32}(Y_n - Y_0) + a_{33}(Z_n - Z_0)} + y_{p2} - x^{-2}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2)$$

ただし、 a_{ij} : ω , ϕ , κ より求まる回転行列。

$$x^{-1} = x_n - x_p, \quad y^{-1} = y_n - y_p$$

$$r = x^{-1^2} + x^{-2^2} \text{である。}$$

実際の実験におけるひずみの計測は、以下の手順によりなされる。

- ①座標が既知である点を多数配置したテストパターンを撮影する。(座標系は任意に定める。) 各点の座標は、式 a, b 中の (X_n, Y_n, Z_n) のことである。
- ②撮影された各点の写真上での座標 (x_n, y_n) を求める。これは、式 a, b 中の (x_n, y_n) である。
- ③1つの点の撮影より、式(1)、式(2)の2つの式が得られるので、撮影した点の数の2倍の数だけ式が得られる。よって、座標既知の点を6個以上配置することで、12個以上の式が得られるの

で、最小二乗法を用いて、カメラを定義する 11 個の変数が求まる。

④11 個の変数が求まっている 2 台のカメラで鋼管上にマーキングされた点を撮影し、式の関係を逆に用いれば、点の座標を求めることが出来る。

⑤計測面における点の座標より、撮影段階での面の形状が求まるので、それより、ひずみを計算できる。

このひずみ計測原理の詳しい説明については、参考文献を参照していただきたい³⁾。

5. ひずみ計測結果

5. 1 各試験体のひずみ分布とひずみ履歴

試験体 1 では、始めに圧縮を加えた側の面でき裂が発生したので、この面のひずみ分布を示す。各載荷段階の圧縮変位ピーク時における軸方向ひずみ分布を図-10、周方向ひずみ分布を図-11に、引張変位ピーク時における軸方向ひずみを図-12、周方向ひずみを図-13 に示す。試験体 2 でも、始めに圧縮を加えた側でき裂が生じたので、この面のひずみ分布を図-14, 15, 16, 17 に示す。なお、試験体 1 については、き裂がちょうど基部のところに発生したため、一番下側にあるマーキングの点でき裂発生位置を含んでおらず、この場所での

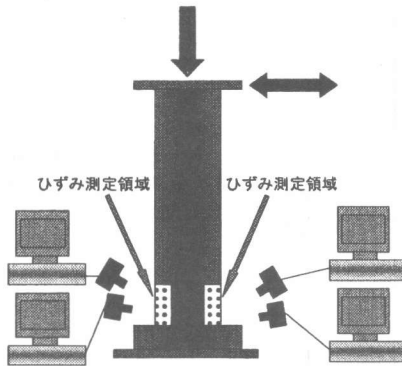


図-7 ひずみ計測システム

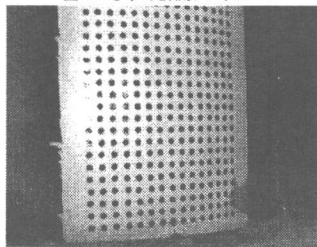


図-8 鋼管へのマーキング

ひずみが計測できなかった。そこで、このひずみは試験体2のひずみ分布より推定して、圧縮時は直線により外挿することで、引張時は座屈上側裾部と同じであるとして求めた。既往の研究でも、ひずみ分布の傾向は全ての試験体で同様であるので、この推定は妥当と考えられる。なお、各载荷段階は3回づつ繰り返されているが、それぞれの回の差は小さかったので2回目の载荷におけるひずみ分布をここでは記している。

圧縮変位ピーク時には、計測面に作用する圧縮力により、座屈が大きく張り出す。この時、軸方向、周方向ともに座屈頂部では他の場所より大きな引張りひずみが生じ、座屈裾部では軸方向に圧縮ひずみが生じ、周方向のひずみはほとんどゼロとなる。このため、圧縮時には位置によって大きなひずみの差ができていく。引張変位ピーク時には、圧縮時に生じていた座屈が軸方向に引っ張られて小さくなる。これにより、座屈頂部の軸方向引張りひずみは圧縮時よりも小さくなり、全体的に引っ張られるため、裾部では引張りひずみが生じる。このため、位置によるひずみの差は小さくなる。一方、周方向のひずみは全ての場所で非常に小さくなっている。試験体1と試験体2でひずみ分布を比較すると、試験体2のほうが試験体1よりも、

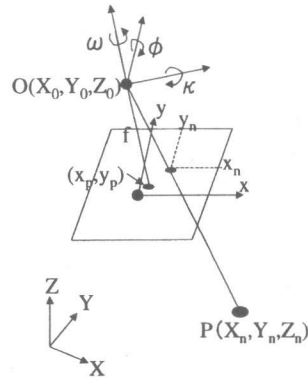


図-9 座標系

圧縮時、引張時とも大きなひずみが生じており、試験体2の座屈頂部では最終的に35%を超える大きなひずみが発生している。

一番大きくひずみ変動するのは、座屈頂部と座屈の上側と下側の裾部であり、この3箇所のいずれかにおいてき裂が生じるので、これらの場所のひずみ履歴が重要である。それぞれの場所でのひずみの大きさを、载荷段階により整理したものを試験体1について図-18に、試験体2について図-19に示す。

5. 2 低サイクル疲労強度の検討

き裂発生位置（試験体1では座屈下側裾部、2では座屈頂部）でのひずみ履歴が分かるので、これより、低サイクル疲労強度を照査して求めるき裂発生時期が実際のき裂発生時期と一致するかを確かめた。

き裂の発生は、き裂に直角に生じる軸方向ひずみによると考えられるので、軸方向ひずみを対象に計算を行った。本研究では、個々の塑性ひずみ振幅を線形被害側によって累積し、次式のように等価塑性ひずみ振幅を計算した。

$$\Delta \varepsilon_{p,ep} = \frac{\sum \Delta \varepsilon_{p,i} \cdot n_i^{kp}}{N^{kp}} \quad (3)$$

$$N = \sum n_i \quad (4)$$

ただし、 $\Delta \varepsilon_{p,ep}$ は等価塑性ひずみ振幅、 $\Delta \varepsilon_p$ は塑性ひずみ振幅で n は個々の塑性ひずみ振幅の繰り返し回数である。

また、 K_p は式(5)に示す 400MPa 級の構造用鋼材について砂時計型試験片より求められた低サイクル疲労寿命曲線⁴⁾より 0.54 とした。

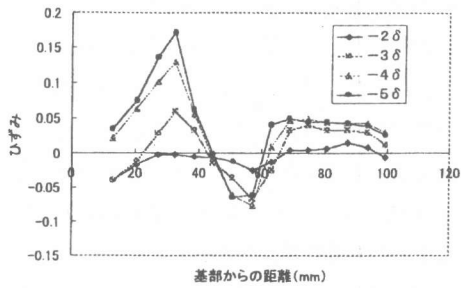


図-10 試験体1、圧縮変位ピーク時軸方向ひずみ分布

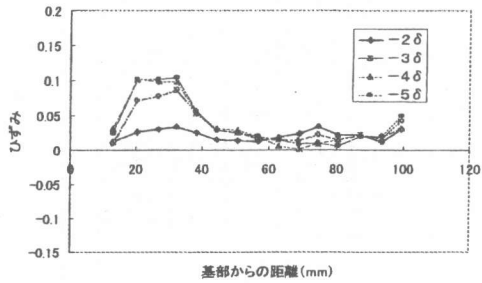


図-11 試験体1、圧縮変位ピーク時周方向ひずみ

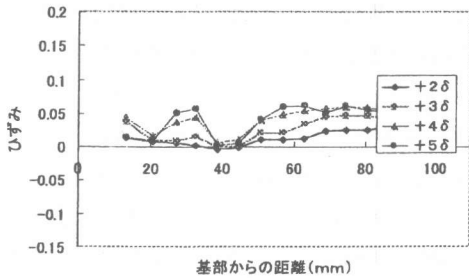


図-12 試験体1、引張変位ピーク時軸方向ひずみ

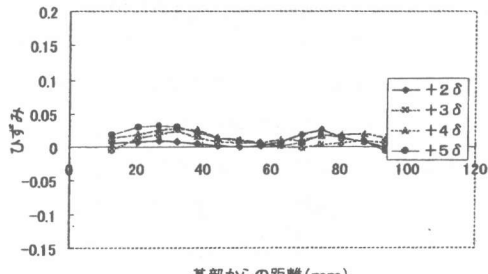


図-13 試験体1、引張変位ピーク時周方向ひずみ

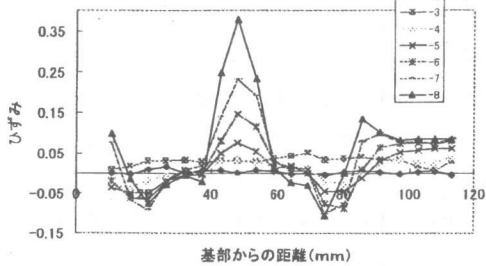


図-14 試験体2、圧縮変位ピーク時軸方向ひずみ

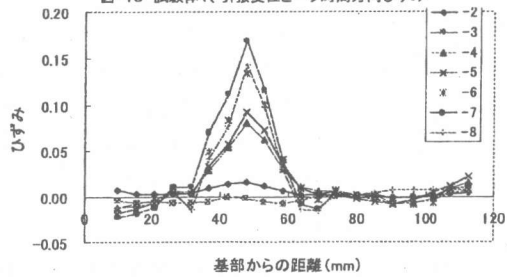


図-15 試験体2、圧縮変位ピーク時周方向ひずみ

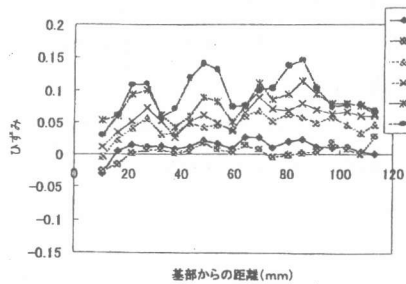


図-16 試験体2、引張変位ピーク時軸方向ひずみ

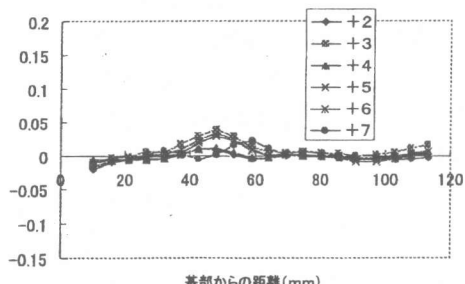


図-17 試験体2、引張変位ピーク時周方向ひずみ

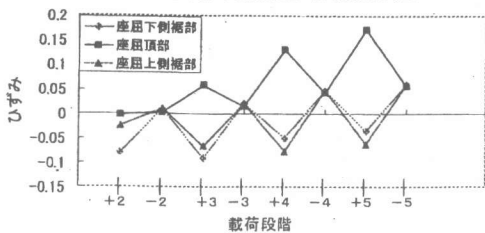


図-18 試験体1、ひずみ履歴

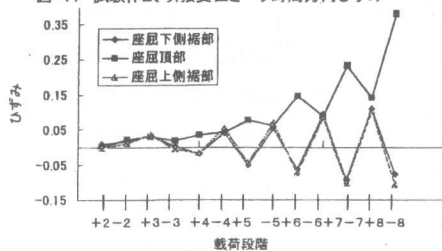


図-19 試験体2、ひずみ履歴

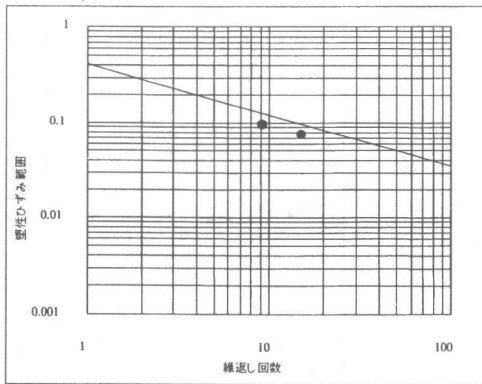


図-20 低サイクル疲労寿命曲線によるき裂発生時期の照査

$$\Delta \varepsilon_p \cdot N_f^{0.54} = 0.42 \quad (5)$$

き裂発生時の等価塑性ひずみ振幅を式(5)に示す寿命曲線と比較したものを図-20に示す。各点とも寿命曲線の近傍にプロットされている。これは、ひずみによる累積疲労損傷度が理論的にき裂の発生する値まで蓄積された時に、実際にき裂が生じたということである。なお、試験体2への荷重は片振幅を一定にしたため、荷重条件が異なっているにもかかわらず、ひずみ履歴とき裂発生条件の関係にはほとんど影響していないことから、径厚比、荷重条件の違いによらず低サイクル疲労のアプローチによりき裂発生時期を予測することが可能であることが示された。

なお、試験体1については、き裂の発生した座屈下裾部で最も大きなひずみ振幅が生じているので、ここにき裂が生じたのは妥当であるが、試験体2については、座屈下裾部、座屈上裾部で、き裂の発生した座屈頂部より大きなひずみ振幅が生じており、なぜ、始めに座屈頂部にき裂が生じたのか明らかでない。一つの原因として、座屈頂部に生じているひずみ振幅は裾部のものより小さいのだが、個々のひずみは裾部のものよりも大きく、このことが影響している可能性がある。また、座屈下側裾部、上側裾部では周方向には小さなひずみしか生じていないが、座屈頂部では、大きな周方向ひずみが生じており、このことが影響している可能性も考えられる。これらの検討は今後の課題としたい。

6. まとめ

画像計測により CFT 柱座屈部のひずみを計測し、そのひずみ履歴より鋼管の低サイクル疲労強度を検討することでき裂発生時期が予測可能であることを示した。径厚比の異なる2種類の試験体でこのアプローチの有効性を示すことで、これが径厚比によらず成り立つという可能性を示唆した。

本研究により、ひずみよりき裂発生時期を予測することの有効性がより普遍的に示された。さらに、CFT 柱の部材諸元や荷重パラメーターとき裂発生時期の関係が分かれば、き裂の発生条件をより明確にすることができると考えている。

謝辞 本研究を実施するにあたり、芝浦工業大学卒業生の佐藤智一君、魚本研究室の皆様にご多大のご助力を頂きました。ここに記して感謝致します。なお、本研究の一部は、平成11、12年度文部省科学件研究費補助金基盤研究B(2)(館石)によったことを付記します。

参考文献

- 1) 村田清満, 安原真人, 渡辺忠明, 木下雅則: コンクリート充填鋼管柱の耐荷力と変形性能評価, 構造工学論文集, vol.44A, pp.1555-1564, 1998
- 2) 館石和雄, 村田清満: 画像計測によるコンクリート充填鋼管部材のひずみ特性, 構造工学論文集, vol.45A, 1998
- 3) 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
- 4) 西村俊夫, 三木千寿: 構造用鋼材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.