実大コンクリート充填鋼管の繰返し局部座屈破断に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE CYCLIC LOCAL BUCKLING FRACTURE OF FULL-SCALE CONCRETE-FILLED TUBES

河野昭彦*, 松井千秋**, 木村俊之***, 田中幸仁***
Akihiko KAWANO, Chiaki MATSUI, Toshiyuki KIMURA
and Yukihito TANAKA

The low cycle fatigue following cyclic local buckling is one of the important fracture modes of concrete-filled tubular members (CFT members). The authors have already proposed a formula to estimate the loading cycles up to the fracture. The formula has been empirically derived from the experimental database of the small-scale specimens such as the outside diameters are less than or equal to 101.6 mm. Therefore, the research need was remained for the scale effect in the fracture mode. From this point of view, the paper conducted the full-scale experiment in which the specimens have the outside diameters of 355.6mm or 216.3mm. The experiment showed that (1) the scale effect might be negligible in the range of specimens, and (2) the estimation formula, to which a slight arrangement was done to enlarge the parameter range of diameter-to-thickness ratios, was applicable to the full-scale specimens too.

Keywords: concrete filled tube, local buckling, fracture, earthquake resistant capacity, scale effect
コンクリート充填鋼管, 局部座屈, 破断, 耐震性能, 寸法効果

1. 序

コンクリート充填鋼管 (CFT) 部材が繰返し荷重を受ける場合の破壊形式の一つは、局部座屈部分が破断するという形式である。この場合の局部座屈はいわゆる象足形座屈で、局部座屈発生から破断に至るまで多くの加力サイクルを必要とする大変安定した形式である¹⁾。そこでその領域の変形あるいはエネルギー吸収を積極的に利用するため、著者はこの破壊形式の破断サイクルの予測式を提案したが^{2), 3)}、この予測式は外径 101.6mm 以下の小口径 CFT 試験体による実験式であった。しかし、破断現象は寸法の影響を受けると考えられるので、実際によく使用される範囲で、しかも脆性破壊はしない程度の寸法を目標として、外径 355.6mm と 216.3mm の CFT 試験体の実験を計画した。いずれはこの破断現象も理論的に解明されるべきであるが、まずは実験データの蓄積が必要であると考えた。実験は、これらの CFT 試験体に繰返し曲げを作用させて、局部座屈破断させるものである。

CFT 部材の局部座屈破断は、既往の繰返し軸力を作用する実験から、曲げ座屈に対する座屈長さには無関係で、危険断面近傍の最外縁の変位振幅に強く関係することが分かっている。これによれば、荷重が軸力であるか曲げであるかなど、荷重の種類にもほとんど関係ないはずである。本研究はこの点にも考察を加えている。ただし、破断を決定する最外縁の変位振幅は、部材の寸法や荷重条件から骨組解析

などによって求めることになる。さらに、鋼管の径厚比もこれまでの 50 を越える 60 の試験体が含まれており、これまでの破断予測式に対して、径厚比の適用範囲を拡大すると同時に径厚比を連続量として取り扱えるよう修正を加えた。

2. 実験概要

2.1 実験変数

実験変数は、鋼管の断面寸法を 2 種類 (外径 $D = 355.6\text{mm}$, 216.3mm)、それぞれの断面寸法で鋼管の径厚比を 3 種類、および荷重条件の 3 種類である。荷重条件の 1 番目は、図 1(a) に示すように試

図1 荷重条件

* 九州大学人間環境学研究所 助教授・工博

** 九州大学人間環境学研究所 教授・工博

*** 九州大学人間環境学研究所 大学院生

Assoc. Prof., Graduate School of Human Environment Studies, Kyushu University,
Dr. Eng.
Prof., Graduate School of Human Environment Studies, Kyushu University,
Dr. Eng.
Graduate Student, Graduate School of Human Environment Studies, Kyushu University

表1 実験変数

試験体	D (mm)	D/T	荷重条件
C312-1	355.6	29.4	等曲げ, 両振り
C312-2	"	29.4	等曲げ, 片振り
C312-3	"	29.4	曲げ剪断, 両振り
C309-1	"	39.4	等曲げ, 両振り
C309-2	"	39.4	等曲げ, 片振り
C309-3	"	39.4	曲げ剪断, 両振り
C306-1	"	59.3	等曲げ, 両振り
C306-2	"	59.3	等曲げ, 片振り
C306-3	"	59.3	曲げ剪断, 両振り
C209-1	216.3	27.6	等曲げ, 両振り
C209-2	"	27.6	等曲げ, 片振り
C206-1	"	39.6	等曲げ, 両振り
C206-2	"	39.6	等曲げ, 片振り
C204-1	"	47.9	等曲げ, 両振り
C204-2	"	47.9	等曲げ, 片振り

験体に繰返し等曲げを両振りで作作用するもの、2番目は、やはり図1(a)に示す繰返し等曲げであるが、これを片振りで作用するもの、3番目は、両振り荷重であるが、図1(b)に示すように両端で偏心量をやや変化させ、曲げと共に僅かなせん断も作用するものである。荷重の制御は、図1(a)に示すように、試験体の材長2Dの相対たわみ角振幅で行い、いずれも振幅を一定として、試験体が破断するまで荷重する。また、図1(a),(b)の荷重条件では、試験体の軸力が変動することになるが、偏心量が大きいために変動量は断面の圧縮耐力の高々6%である。これらの実験変数をまとめて表1に示す。

2.2 試験体および加力装置

試験体は図2(a),(b)に示すように $D=355.6\text{mm}$, 216.3mm の円形鋼管にベースプレートを取り付けてコンクリートを充填したものである。試験体の材長はいずれも $1,200\text{mm}$ であるが、塑性化させる部分は材中央の鋼管外径 D の2倍長の部分であり、それ以外の部分は同種の鋼管を縦に2分割したものをカバープレートとして溶接して補強している。充填コンクリートは縦打ちとし、ベースプレート中央の打設用孔から充填した。ベースプレートには空気抜き用の小孔があり、この孔から空気が逃げたことを確認した上で打設を終了した。

使用した材料は、鋼管はSTK400の冷間成形電縫鋼管であり、充填コンクリートはポルトランドセメントと最大粒径20mmの粗骨材を使用し、設計強度30MPaを目標に調合した普通コンクリートである。鋼

表2 鋼管の寸法と材料特性

鋼管 (mm)	D (mm)	T (mm)	A (mm ²)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	伸び (%)	YR (%)
355.6 ϕ x12	355.6	12.09	130.5	360	431	13.1	20.6	83.6
355.6 ϕ x9	355.6	9.04	98.4	349	432	11.2	19.1	80.8
355.6 ϕ x6	355.6	5.99	65.8	394	465	11.6	18.0	84.6
216.3 ϕ x9	216.3	7.85	51.4	399	473	11.1	16.3	84.4
216.3 ϕ x6	216.3	5.46	36.2	422	494	11.5	16.5	85.5
216.3 ϕ x4	216.3	4.52	30.1	404	483	11.3	14.0	83.6

D: 外径, T: 管厚, A: 断面積, σ_y : 降伏応力度, σ_u : 最大応力度,

ϵ_u : 最大応力度時のひずみ, YR: 降伏比

表3 充填コンクリートの調査

セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	高性能 減水材 (kg/m ³)	水セメン ト比 (%)	スランブ (cm)	空気 (%)
333	163	755	1087	0.832	49	12	5.3

表4 充填コンクリートの材料特性

試験体	$c\sigma_B$ (MPa)	ϵ_u (%)	打設日	試験日	材齢 (日)
C306-1, C309-1	33.7	0.19	1998.10.2	1998.11.12	41
C312-1, C209-1	36.0	0.15	1998.10.2	1998.11.20	49
C204-1, C206-1	35.0	-	1998.10.2	1998.12.04	63
C306-2, C309-2, C312-2	37.7	0.18	1998.10.2	1999.6.18	259
C204-2, C206-2, C209-2	42.3	0.18	1998.10.2	1999.6.4	245
C306-3, C309-3, C312-3	41.0	0.17	1998.10.2	1999.6.25	266

$c\sigma_B$: 100 ϕ のシリンドラ圧縮強度, ϵ_u : 圧縮強度時のひずみ

管の寸法と材料特性を表2に、コンクリートの調査と材料特性をそれぞれ表3および表4に示す。

図3は加力装置である。試験体の両端のベースプレートは加力梁に高力ボルトで接合される。加力梁の他端は押・引1000kN能力の油圧ジャッキがロードセルを介してピンで接続されている。加力梁はH-588x300x12x20のロールH形鋼をカバープレートで補強したものである。油圧ジャッキが押しの場合、試験体には引張軸力と曲げモーメントが作用する。このときを正側加力とする。既述のとおり軸力変動は相対的に小さい。図3は等曲げの場合を示しているが、曲げせん断を作用する場合は、図1(b)のように油圧ジャッキの片側のピンの位置を500mmほど内側へずらす。実験は加力装置を水平に配置して、理研機器(株)製の自動加力装置で油圧ジャッキを駆動して遂行した。

変位は図4(a)に示すようにCFT試験体の材中央の検長2D間の最外縁変位を変位計2台で測定した。検長の変位は測定治具のスライド量として現れ、これを変位計で測定する。測定治具のスライドはリニ

図2 CFT試験体

図3 加力装置

図4 変位の測定

アモーションベアリングを用いたスライド装置でがたつきなく行われる。試験体にはバネを使ってナイフエッジで試験体を挟むように取り付けられている。二つの変位計の値の差を D で除したものは検長 $2D$ 間の相対たわみ角 θ に相当する。加力制御はこの θ で行った。歪は図2(a)および(b)に示す位置に貼付した歪ゲージによって測定した。

2.3 実験結果

2.3.1 実験耐力と破壊モード

表5に最大荷重 P_{max} 、局部座屈発生時の加力サイクル数 n_{lb} 、破断時の加力サイクル数 n_c 、および破断位置を示す。表5の P_{max} の計算値は、表2の σ_y と表4の σ_B を用いたSRC規準の一般化累加式⁴⁾による終局強度であり、比率は実験値を計算値で除したものである。ただし、充填コンクリートの圧縮強度の低減率 f_{cu} は1.0とした。また、試験体の軸力変動も考慮しているが、曲げ耐力に及ぼす影響は小さい。表か

表5 実験結果による耐力と破断

試験体	P_{max}						n_b	n_c	破断位置	A_{2D} (%)	L/B
	正側加力			負側加力							
	実験	計算	比率	実験	計算	比率					
C312-1	416	351	1.19	-427	-374	1.14	1	39	端部	4.40	2>1
C312-2	434	350	1.24	-356	-376	0.95	1	38	端部	3.96	2>1
C312-3	503	391	1.29	-518	-434	1.19	1	15	端部	4.56	1
C309-1	307	262	1.17	-323	-285	1.13	1	22	端部	4.42	2>1
C309-2	341	264	1.29	-262	-288	0.91	1	14	中央	4.42	1
C309-3	397	295	1.35	-411	-333	1.23	1	8	端部	5.37	1
C306-1	226	204	1.11	-235	-225	1.05	1	9	中央	4.72	1
C306-2	249	208	1.20	-174	-229	0.76	1	9	端部	4.76	2>1
C306-3	291	229	1.27	-310	-264	1.17	1	5	端部	5.66	1
C209-1	104	93.7	1.11	-111	-97.6	1.13	1	51	端部	4.16	2>1
C209-2	115	93.7	1.22	-91.1	-98.3	0.93	1	45	端部	4.11	2>1
C206-1	83.5	72.1	1.16	-89.2	-75.7	1.18	1	25	端部	4.11	2>1
C206-2	71.1	73.3	0.97	-73.5	-76.9	0.96	1	18	端部	4.30	2>1
C204-1	65.2	58.2	1.12	-75.0	-61.7	1.21	1	15	端部	4.09	2>1
C204-2	73.5	59.5	1.24	-53.9	-62.4	0.86	1	11	端部	4.42	2>1

P_{max} : 最大荷重, n_{lb} : 局部座屈発生サイクル数, n_c : 破断サイクル数

ら、等曲げ・片振りの試験体の負側加力時の実験耐力は最大耐力を発揮する変形に達していないので計算値との比率はやや低い、それ以外は実験値が計算値によって安全側に評価されていると言える。

表の A_{2D} は、危険断面の最外縁の $2D$ 間変位振幅で、図4(a)の2台の変位計のうち破断した側の変位計で測定された変位振幅を検長 $2D$ で除した値であり、後述の荷重変形関係がほぼ定常状態になった時点での振幅を読み取ったものである。

すべてのCFT試験体は、鋼管の破断で崩壊した。まず、第1サイクルで局部座屈が鋼管全長にわたって数波生じ、その後、2波あるい

図5 M - ϕ 関係 ($D = 355.6\text{mm}$, $D/T = 39.4$) 図6 P - A_{2D} 関係 ($D = 355.6\text{mm}$, $D/T = 39.4$)

は1波が成長し、残りは目立たなくなった。破断は成長した局部座屈の山で生じた。Dが216.3mmの試験体およびDが355.6mmの試験体のうちC312-1, C312-2, C309-1, C306-2は、最終段階まで局部座屈が両端に2波成長してどちらで破断しても不思議ではない状態であった。表5のL.B.欄に示す"2>1"のマークがその挙動を表す。試験体C309-2とC306-1は材中央の1波だけが成長して破断した("1")。曲げ剪断を受けるC312-3, C309-3, およびC306-3ではモーメントが大きな方の端部に1波だけが成長した。破断サイクル数 n_c は2波が同時に成長する場合と初期から1波だけが成長する場合では大きく異なっている。つまり、2波同時の場合は一つの局部座屈部分の膨らみは小さく、 n_c は多くなった。

2.3.2 荷重-変形関係

図5(a)~(c)は、D=355.6mm、D/T=39.4のCFT試験体の曲げモーメントMと曲率 ϕ の関係を示している。ただし、曲げせん断を受ける場合[図5(c)]のMは大きな方の材端曲げモーメントを表す。他の試験体についてもほぼ同様な履歴曲線が得られている。図では、曲率 ϕ にDを乗じた無次元化曲率 ϕD で表している。結局、 ϕD は相対たわみ角 θ の2分の1に対応する。図5(a)は、等曲げが両振りで作用した場合で、局部座屈が2波同時に成長し続けたものである。図5(b)は、等曲げた片振りで作用した場合で、局部座屈は材中央の1波だけが成長した。そのため破断サイクル数 n_c は両振りに比べて半減している。図(c)は、曲げせん断が作用する場合で、モーメントが大きな方に局部座屈が1波だけが成長した。この場合は曲率振幅も大きいためにさらに n_c が減少している。図中の点線は一般化累加式による終局強度を表しており、おおむね良好な一致が見られる。ただし、Mが負の時は圧縮軸力が作用している。

図6(a)~(c)は、図5(a)~(c)と同じCFT試験体の荷重Pと検長2Dの変位の関係を示している。図では、検長2Dを1と置き、これに対する変位を Δl で表している。 Δl は亀裂が先に生じた側の2D間変位である。図から分かるとおり、第2サイクル以降は、 Δl の振幅はほぼ変化せず、この値を読み取ったものが表5の A_{2D} である。

3. 破断サイクル数と予測式

3.1 破断サイクル数 n_c - A_{2D} 関係

図7(a)~(c)は、破断サイクル数 n_c と2D間変位振幅 A_{2D} の関係を表す。図では、既往の実験結果^{2), 3)}は黒丸で、今回の実験結果は白丸また

は白三角で示している。ただし、今回の実験結果のうち、最終段階まで局部座屈が2波同時に成長したものは、読み取った Δl の振幅の塑性変形成分(弾性変形の除いた成分)を2分の1に低減して評価して A_{2D} に換算した。それは、 Δl の塑性変形成分は主として局部座屈部分によるものであり、局部座屈が2波同時に存在する場合はこの塑性変形成分が両者に二分されると考えられるからである。

文献2)では次式で表される破断サイクル数 n_c の予測式を提案した。

$$\begin{aligned} D/T=20: n_c &= 180 \exp(-37A_{2D}) \\ D/T=30: n_c &= 60 \exp(-29A_{2D}) \\ D/T=50: n_c &= 20 \exp(-21A_{2D}) \end{aligned} \quad (1)$$

図7(a), (b), (c)のそれぞれにD/Tが20, 30, 50の場合の上式の値を実線で示している。図7(a)は黒丸で示される既往の小口径試験体(D≤101.6mm)の実験結果だけであるが、対応関係は良い。図7(b), (c)には白丸あるいは白三角によって今回の大口径試験体(D=355.6mm, 216.3mm)の実験結果も併せて示している。図7(b)のD/T=30の場合では、既往の小口径試験体と今回の大口径試験体の破断サイクル数 n_c は A_{2D} が同じであればほぼ同じであり、予測式に対する対応関係もよい。図7(c)ではD/Tが50以外の40と60の実験値も示しているが、D/T=40の実験値はおおむね予測式の上側に、60の実験値はおおむね等しいか下側に位置していて対応関係は悪くない。

新旧の実験結果が、D/Tおよび A_{2D} が同じであればほぼ同じ破断サイクル数 n_c を示したこと、さらに(1)式の破断予測式と良い対応を示したことから、次の知見が得られる。第1は、破断サイクル数 n_c は、軸力、等曲げ、あるいは曲げせん断、または、両振り・片振りなどの荷重条件には直接の関係はなく、 A_{2D} のみに関係する。第2は、外径が355.6mm程度までは破断における寸法効果の影響を無視でき、予測式は新旧の実験結果と良く対応している。ただし、D/Tが40と60の場合を表現できないので、この点を次節で修正する。

3.2 修正破断予測式

(1)式の予測式に対して、径厚比を連続変数として取り扱えるよう修正を加える。(1)式は図7(a)~(c)に示すように、 n_c の対数値が A_{2D} と線形関係にあるとするものである。なお、ここには示していないが、通常の疲労曲線に準じて n_c と A_{2D} の両対数値を線形関係とすると、 A_{2D} が小さい領域と大きい領域で危険側誤差が大きくなることが分かっている。(1)式は A_{2D} が0.14のときに破断サイクルが1.0になるような片対

図7 破断サイクル数 n_c -最外縁2D間変位振幅 A_{2D} 関係

図8 破断サイクル数 n_c -最外縁2D間変位振幅 A_{2D} 関係

数の直線関係になっており、次のように表される。

$$n_c = \exp\{a(0.14 - A_{2D})\} \quad (2)$$

上式の a を径厚比 D/T の関数と考えることにする。これまでの実験結果に基づき、かつ、(1)式の予測式とほぼ同程度の評価を与える簡単な式として次式を導出した。

$$n_c = \exp\left\{\left(10 + \frac{600}{D/T}\right)(0.14 - A_{2D})\right\} \quad (3)$$

図8(a)は、実験の破断サイクル数 n_c と(3)式の新予測式による n_c の比率を D/T に対して示したものである。これによって、新予測式は、 D/T の変化に対してはほぼ一様な比率で、実験の下限値に近いところをおさえていることが分かる。図8(b)は、同じく実験値と予測値の比率を A_{2D} に対して示したものである。この図より、新予測式は A_{2D} に対してもほぼ一様な比率で実験値を評価していると言える。

図8(c)は、実験の n_c と新予測式の n_c の比較である。 A_{2D} が2%未満の場合は局部座屈がなかなか発生しない場合もある。そこでこれらを除いた51体分で統計量を求めると、実験値と予測値の比率は平均で1.16、変動係数は27.7%であった。ばらつきはあまり小さくないが、工学的使用に十分耐え得るものと考えられる。

4. 結論

実大と考えてよい程度のCFT部材に対して繰返し曲げあるいは曲げせん断を作用する実験を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 実験から得られた耐力は、SRC標準の一般化累加式による終局強度とほぼ良い一致を示した。
- (2) 破壊形式は、すべて鋼管部分の局部座屈後の破断であった。等曲げを作用した試験体の局部座屈は両端部に2波が最終段階まで成長し続ける場合と材中央に1波だけが成長する場合の2通りがあった。両者の破断サイクルはかなり異なっているが、前者の2D間変位振幅 A_{2D} の塑性成分を2分の1に換算すれば妥当な結果になる。
- (3) 径厚比 D/T と2D間変位振幅 A_{2D} が同じならば、今回の大口径($D = 355.6\text{mm}$, 216.3mm)のCFT試験体と既往の小口径($D \leq 101.6\text{mm}$)のCFT試験体の破断サイクル数には有意な差は認められない。したがって、この程度の断面寸法では寸法効果の影響を無視できる。
- (4) 既往のCFT試験体は軸力、今回のCFT試験体は等曲げあるいは曲

げせん断を作用したものである。これらの破断サイクル数は、 D/T と A_{2D} だけで決定され、そのとき荷重の種類は無関係であった。

(5) 径厚比を連続量として取り扱えるように修正を行った新予測式を提案した。新予測式は A_{2D} が2%未満を除いた全51体分の実験結果を平均値1.16、変動係数27.7%で予測した。

参考文献

- 1) A. Kawano and C. Matsui: An Experimental Study on Hysteretic Behavior of Concrete Filled Tubular Members under Repeated Axial Loading, Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, 1988.8, Vol. IV, IV-133-138.
- 2) 河野昭彦, 松井千秋, 中島隆裕, 高木潤一: 繰返し軸方向力を受けるコンクリート充填鋼管部材の座屈挙動とエネルギー吸収能力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第482号, 1996.4, 131-140.
- 3) A. Kawano and C. Matsui: Buckling Behavior and Aseismic Property of Concrete-filled Tubular Members Under Cyclic Axial Loading, Proceedings of an Engineering Foundation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete III, ASCE, 1997.8, 602-615.
- 4) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・1987.6.
- 5) 木村俊之, 河野昭彦, 松井千秋, 田中幸仁: 実大コンクリート充填鋼管柱の局部座屈後破断則に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第38号・1構造系, 1999.3, pp.577~580.
- 6) 木村俊之, 河野昭彦, 松井千秋, 田中幸仁: 実大コンクリート充填鋼管柱の局部座屈後破断の実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, C-1, 1999.9, pp.1267-1268.

註 本論文の一部は文献5), 6)に発表済みである。

謝辞

本研究は文部省科学研究費基盤研究(C)(2)「繰返し荷重下のコンクリート充填鋼管部材の局部座屈後破断則に関する研究」(代表: 河野昭彦)によった。九州大学文部技官の久島昭久氏と有働文久氏には、加力装置・測定装置の製作と調整, 加力・測定機器の選定と調整に多大なる協力を頂いた。また、試験体の製作は(株)徳田鉄工所をお願いした。ここに記して深甚なる謝意を表します。

(2000年1月7日原稿受理, 2000年5月16日採用決定)