

論文 CFT部材の正負交番繰返し軸方向載荷実験

土井 希祐^{*1}・福島 正樹^{*2}・尹 航^{*3}

要旨： 角形および円形CFT部材の漸増振幅正負交番繰返し軸方向載荷実験を行った。その結果、鋼管の局部座屈および亀裂の進展により、その変形性能とエネルギー吸収性能が限界づけられることを確認した。さらに、累積損傷則に基づいた定変位振幅の場合のCFT部材に関する鋼管の破断サイクル評価式を修正することにより、座屈長さ断面成比が比較的小さく、かつ漸増振幅の場合においても鋼管の破断サイクルを概ね評価できることが明らかになった。

キーワード： CFT部材, 正負交番繰返し軸方向力, 変形性能, 局部座屈, 鋼管破断

1. はじめに

近年、耐震設計において、変形性能を考慮した設計法が取り入れられて来ている。地震時において、中高層建築物の下層階外柱には、転倒モーメントによる水平力に応じた大きな軸力変動が生じる。また、ブレース架構内の部材やトラス部材にも、圧縮～引張の大きな軸力変動が生じる。このため、繰返し軸方向変動軸力下の部材の変形性能およびエネルギー吸収性能を把握することは、構造上より安全な建築物を設計する上で非常に重要である。

CFT(コンクリート充填鋼管)部材は、耐力および変形性能に優れ、高層建築物を中心に普及してきている¹⁾。著者らは、水平力に応じた大きな軸力変動を受けるCFT部材の変形性能およびエネルギー吸収性能に関する実験研究を行っている²⁾。ところで、引張～圧縮の交番繰返し軸方向力を受けるCFT部材について、河野、松井らは、繰返し軸力下におけるCFT部材の亀裂発生までのエネルギー吸収性能の評価法を示しているが^{3)~5)}、漸増振幅交番繰返し軸方向力を受ける場合の研究は数少ない。

本研究は、漸増振幅正負交番繰返し軸方向力を受ける角形および円形CFT部材の静加力実験

を行い、その変形性能およびエネルギー吸収性能に関する基礎的なデータを取得するとともに、鋼管の亀裂発生までの加力サイクル数の評価法について検討することを目的とする。

2. 実験

2.1 試験体

表-1に試験体一覧、図-1に試験体概形、表-2に使用材料の力学的特性を各々示す。試験体はR2, C2, R4, C4の計4体であり、実験変数は試験部の断面形状、座屈長さ断面成比(L_k/D)とした。R2, R4の試験部は角形鋼管(STKR400)、C2, C4の試験部は円形鋼管(STK400)とし、普通コンクリート($F_c=21\text{MPa}$)を充填した。加力スタブは、BH-200×300×16×16(SS400)とし、試験部との接合部は柱通しとした。

2.2 加力方法

図-2に加力装置を示す。試験部は両端固定支持とし、繰返し軸力を作用させた。軸力は、引張(正加力)時には、Aの294kN圧縮引張油圧ジャッキにより、また、圧縮(負加力)時には、Aの294kN圧縮引張油圧ジャッキとBの980kN圧縮油圧ジャッキの併用により作用させた。さらに、Aのジャッキにより試験体柱頭の回転を拘

*1 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*2 大和ハウス工業(株) 工修

*3 新潟大学大学院自然科学研究科 工修

表-1 試験体一覧

試験体	R2	C2	R4	C4
断面				
鋼種	STKR400	STK400	STKR400	STK400
D (mm)	100.0	101.6	100.0	101.6
t (mm)	3.2	3.2	3.2	3.2
L (mm)	400	400	800	800
L _k (mm)	200	200	400	400
A (mm ²)	10000	8107	10000	8107
A _s (mm ²)	1239	989	1239	989
D/t	31.3	31.8	31.3	31.8
L _k /D	2.0	2.0	4.0	3.9
A _s /A (%)	12.4	12.2	12.4	12.2

注) D:断面径, t:鋼管厚, L:材長, L_k:座屈長さ
 A:断面積, A_s:鋼材部断面積, D/t:幅厚比(径厚比)
 L_k/D:座屈長さ・断面径比, A_s/A:鋼材断面積比

束し, Cの490kN圧縮引張油圧ジャッキにより試験部柱頭の水平変位を拘束した。Cのジャッキは試験部内法高さの中央レベルに設置した。

載荷履歴は, 軸歪±0.1%, ±0.2%, ±0.5%, 以降0.5%ずつ増加させ, 各変位振幅で2回ずつ正負交番繰返し軸力を試験体に載荷した。載荷はAおよびBのジャッキを用いて変位制御を行い, 鋼管に局部座屈および亀裂が生じ, 耐力が著しく低下した時点で実験を終了した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

実験により得られた各試験体の最大耐力等の実験値を終局耐力計算値(文献¹⁾ pp.34~38による)とともに表-3に示す。

R2は, 負加力側の最大耐力に達した後, -7サイクル($\epsilon = -0.4\%$, ϵ :軸方向平均歪)で鋼管全面に局部座屈が発生, -9サイクル($\epsilon = -1.5\%$)以降, 局部座屈が進展, 正加力側の+12サイクル($\epsilon = 0.9\%$)で中央下側鋼管コーナー部の局部座屈波頂点に亀裂が発生, +14サイクル($\epsilon = 2.0\%$)以降, 鋼管平坦部へと伸展した。

C2は, 負加力側の-8サイクル($\epsilon = -0.0\%$)で中央上下の鋼管に局部座屈が発生, -11サイクル($\epsilon = -2.0\%$)で中央上の局部座屈が最も顕著になった。正加力側の+14サイクル($\epsilon = 2.0$

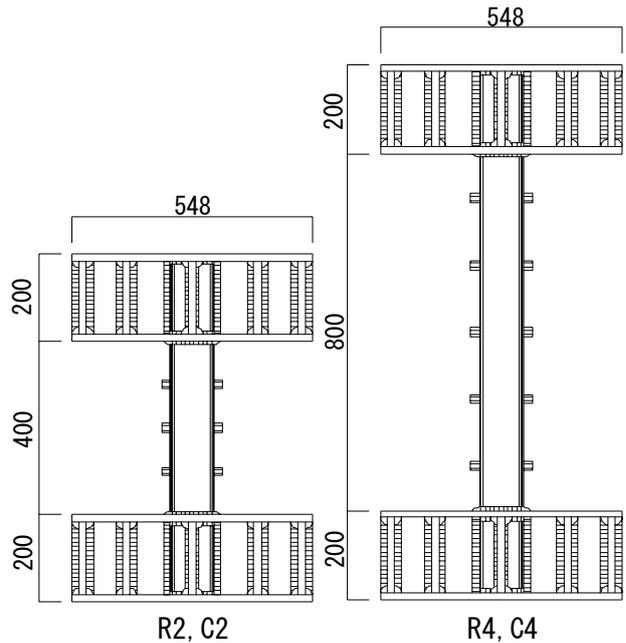


図-1 試験体概形 [寸法単位:mm]

表-2 材料特性

試験体	鋼材			コンクリート		
	σ_y (MPa)	σ_B (MPa)	Es (GPa)	σ_c (MPa)	E _c (GPa)	材齢 (日)
角形	366	440	193	21.2	21.7	28
円形	316	391	193			

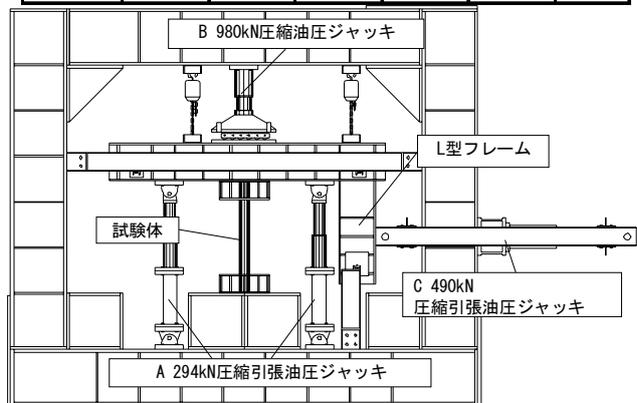


図-2 加力装置

%)で局部座屈波の頂点にひび割れが発生, 同サイクル($\epsilon = 2.4\%$)で中央上に亀裂が発生, 伸展し, +16サイクル($\epsilon = 1.4\%$)で破断した。

R4は, 負加力側の最大耐力とほぼ同時, -5サイクル($\epsilon = -0.5\%$)で下部に局部座屈発生, -7サイクル($\epsilon = -1.0\%$)で全面に局部座屈が発生, 上部において局部座屈波が鋼管外周方向へと広がった。正加力側の+11サイクル($\epsilon = 0.3\%$)で上部コーナー部に小亀裂が発生, 鋼管平坦部に伸展し, +11サイクル($\epsilon = 1.7\%$)で急激な耐力の低下と同時に鋼管が破断した。

表-3 実験結果一覧

		軸力 (kN)				軸歪 (%) [サイクル]			
		R2	C2	R4	C4	R2	C2	R4	C4
終局耐力 計算値	正(引張)	453	338	453	338	—	—	—	—
	負(圧縮)	-611	-524	-611	-524	—	—	—	—
最大耐力時 ^{※1}	正(引張)	557	376	539	369	1.00 [+7]	0.96 [+7]	1.00 [+7]	1.00 [+7]
	負(圧縮)	-697	-518	-682	-531	-0.49 [-5]	-1.00 [-7]	-0.48 [-5]	-1.00 [-7]
初期降伏時	正(引張)	206	247	365	274	0.09 [+2]	0.15 [+3]	0.15 [+3]	0.16 [+3]
	負(圧縮)	-573	-363	-510	-404	-0.22 [-5]	-0.18 [-5]	-0.16 [-5]	-0.14 [-3]
全体座屈発生時		—	—	—	-466	— [-]	— [-]	— [-]	-0.50 [-6]
局部座屈発生時		-562	-254	-675	-487	-0.40 [-7]	0.00 [-8]	-0.50 [-5]	-0.64 [-7]
鋼管亀裂発生時		352	274	221	214	0.90 [+12]	1.13 [+14]	0.30 [+11]	0.50 [+13]
降伏耐力時 ^{※2}	正(引張)	454	312	454	312	0.28	0.23	0.23	0.20
	負(圧縮)	-612	-440	-612	-440	-0.26	-0.27	-0.24	-0.18
限界耐力時 ^{※3}	正(引張)	454	312	454	312	2.57	2.63	1.54	2.20
	負(圧縮)	-612	-440	-612	-440	-1.25	-3.00	-0.69	-1.83
$\varepsilon_u/\varepsilon_y$ ^{※4}	正(引張)	—	—	—	—	9.12	11.43	6.74	10.84
	負(圧縮)	—	—	—	—	4.86	11.03	2.90	10.15

※1 軸歪-1%以内で測定された最大耐力に達した時点

※2 降伏耐力(正加力時は $A_s \times \sigma_s$, 負加力時は $A_s \times \sigma_s + A_c \times 0.85 \sigma_B$)に達した時点
ただし、円形鋼管の拘束効果は考慮していない。

※3 最大耐力以後、降伏耐力まで耐力低下した時点
ただし、実験終了時まで耐力が降伏耐力まで低下しなかった場合、軸歪は最大変形時の値とした。

※4 ε_u : 限界耐力時の軸歪, ε_y : 降伏耐力時軸歪

C4は、負加力側の最大耐力に達した後、-7サイクル($\varepsilon = -1.0\%$)で中央に局部座屈が発生、-8サイクル($\varepsilon = -1.0\%$)以後、全体座屈が発生、進展し、正加力側の+13サイクル($\varepsilon = 0.5\%$)で中央の局部座屈波の頂点に亀裂が発生、同サイクル($\varepsilon = 1.9\%$)で亀裂が伸展した。

R4は他の試験体に比べ小さな変位で局部座屈が発生した。C2の負加力側のみ、軸歪1.0%以内での最大耐力が終局耐力計算値を下回ったが、実験終了時までの最大耐力は終局耐力計算値を上回っていた。C4のみ初期降伏発生後に全体座屈が発生した。これは、C4が L_k/D が大きく曲げ剛性が小さかったためと考えられる。

3.2 荷重-変形関係

各試験体の軸力-軸歪関係を図-3に示す。

正加力側の履歴ループは、鋼管亀裂が発生するまでは紡錘形を示していた。軸歪振幅2.0%以上の加力サイクルにおいて、鋼管亀裂の発生後、亀裂の伸展に伴い耐力は急激に低下した。

負加力側の履歴ループは、小変位振幅では紡錘形を示し、局部座屈発生後はスリップ形へと移行した。局部座屈の進展に伴い負加力側の耐力は徐々に低下した。また、負加力側の各変位振幅における第1サイクルと第2サイクルのピーク時耐力差は正加力側に比べて大きい。充填コ

ンクリートの圧縮抵抗は、各変位振幅の処女サイクルでは有効であるが、第2サイクル以降は効果が低くなるといえる。

4. 変形性能

図-4に軸力-軸歪関係包絡線(奇数サイクルの履歴曲線を包絡したもの)を示す。なお、比較のため、試験体毎に軸力を各々の降伏耐力(表-3 ※2参照)で除して基準化している。正加力側において、全ての試験体が軸歪1.0%で最大耐力に達した後耐力が低下し、その後、鋼管の亀裂発生により急激に耐力が低下した。C2, C4(円形断面)ではR2, R4(角形断面)と比較して最大耐力以降の耐力低下率が若干少ない。負加力側において、R2, R4では軸歪-0.5%で、C4では軸歪-1.0%で最大耐力に達した後耐力低下しているが、C2は鋼管破断により実験を終了するまで耐力の低下は見られなかった。また、同断面形状の試験体について比較すると、 $L_k/D=4$ の場合は、 $L_k/D=2$ の場合と比較して最大耐力以降、早期に耐力が低下している。

図-5に累積塑性変形(繰返し载荷を受ける構造部材の履歴曲線を等価な単調載荷曲線に変換したもの)による軸力-軸歪関係包絡線⁶⁾を示す。図-5より、正加力側、負加力側ともにC2, C4

は高い変形性能を示している。これは、円形鋼管の場合、鋼管とコンクリートの協働効果により、正加力側では鋼管の耐力が、負加力側ではコンクリートの耐力が大変位振幅まで維持されたためと考えられる。円形断面、角形断面ともに、 $L_k/D=2$ の場合は、 $L_k/D=4$ の場合と比較し

てより高い変形性能を示した。

5. エネルギー吸収性能

繰返し荷重を受ける部材の普遍的な耐震性能の指標の1つとして、エネルギー吸収性能がある。図-6に各試験体の亀裂発生サイクルまでの

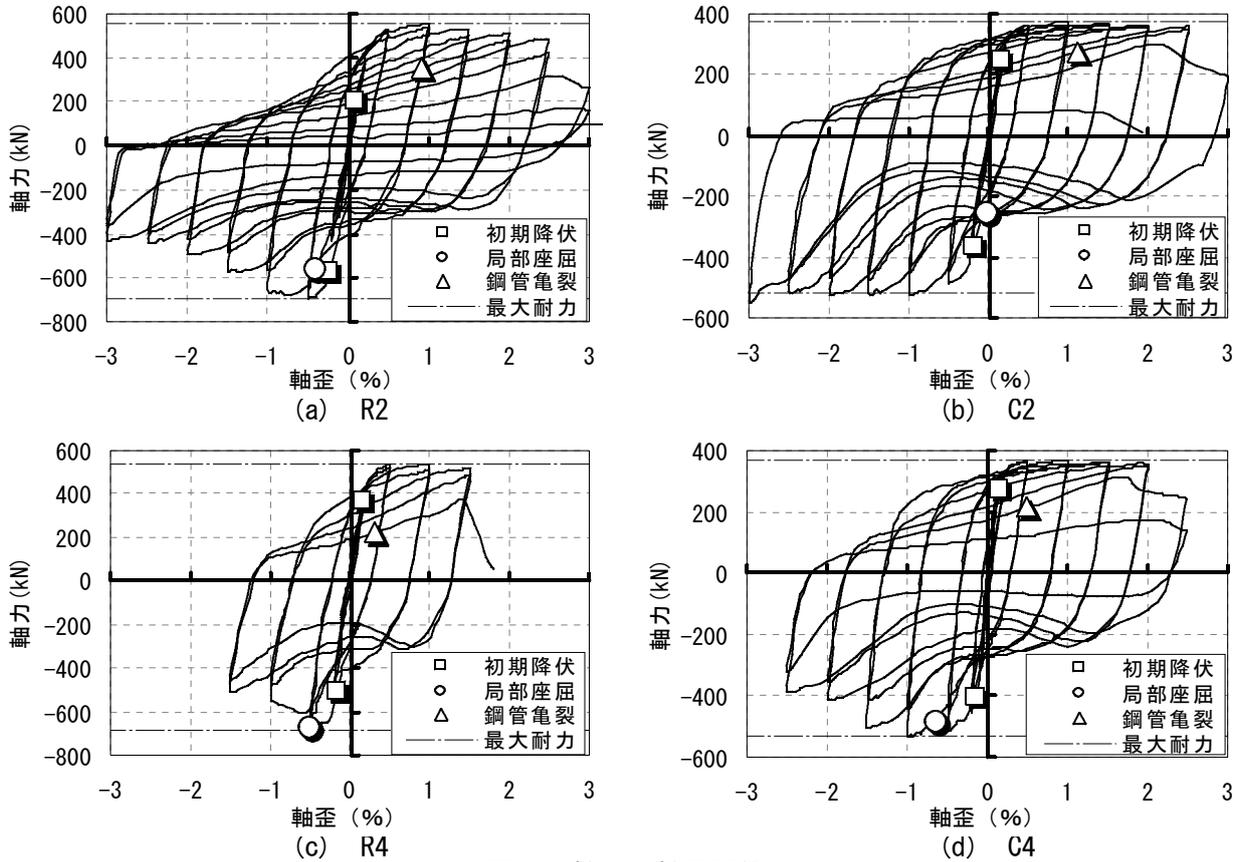


図-3 軸力-軸歪関係

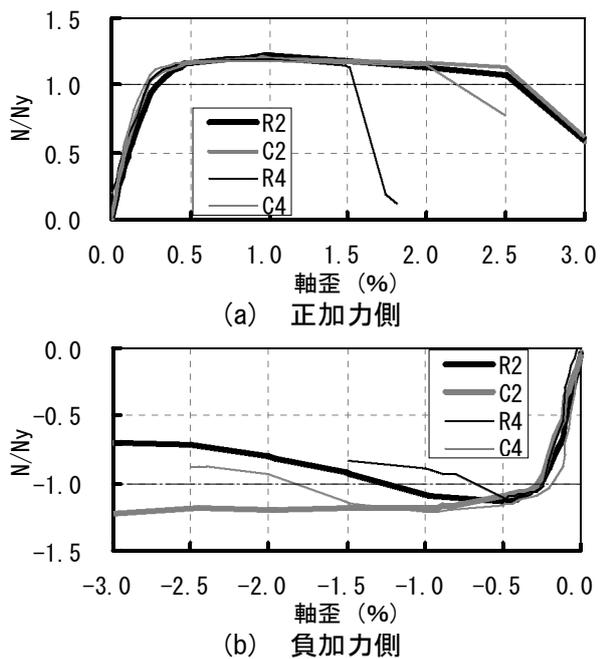


図-4 軸力-軸歪関係包絡線

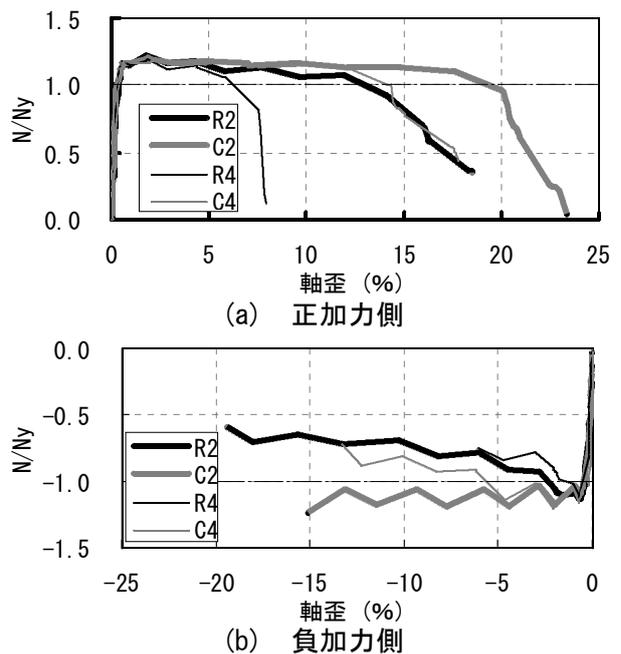


図-5 軸力-累積軸歪関係包絡線

各変位振幅における吸収エネルギー—軸歪関係を示す。ただし、吸収エネルギー¹⁾は、各変位振幅で吸収するエネルギー W (各サイクルにおける履歴ループ面積)を鋼管の引張降伏時の軸力 N_y と軸方向変位 δ_y の積で基準化している。

各変位振幅における吸収エネルギーは、C2, C4(円形断面)の方がR2, R4(角形断面)を上回っており、 L_k/D が同じ場合、 $\varepsilon=1.0\%$ 以上の大変位振幅において、その差は顕著である。円形断面の方が角形断面より大变位振幅時の吸収エネルギーが大きいといえる。

同じ断面形状の場合、各変位振幅における吸収エネルギーは、 $L_k/D=4$ の方が $L_k/D=2$ の場合を上回っている。しかし、鋼管に亀裂が発生するまでの全吸収エネルギー量は $L_k/D=4$ の方が少なかった。

−7〜−8サイクル($\varepsilon=-1.0\%$)で局部座屈が発生したR2, C2, C4は軸歪1.5%まで、−5サイクル($\varepsilon=-0.5\%$)で局部座屈が発生したR4は軸歪1.0%まで、吸収エネルギー量はほぼ直線的に増加しているが、その後増加率は減少している。また、C2, R4, C4は、亀裂発生後の耐力低下により吸収エネルギー量が減少していたが、鋼管の亀裂発生後も耐力を維持したR2は、亀裂発生サイクルにおいてもエネルギー吸収量は増加した。

6 亀裂発生までの加力サイクル数

6.1 定変位振幅下の鋼管亀裂発生サイクル数

CFT部材の破壊形式の1つに、鋼管が局部座屈し、荷重の繰返しによりその部分の鋼管壁が屈曲・伸張を繰返し、ついには鋼管亀裂・破断に至る局部座屈後破断形式がある。河野、松井らは、局部座屈発生から亀裂発生まで多くの加力サイクルを必要とすることから、その領域にある変形・エネルギー吸収を積極的に利用するため、この破壊形式の亀裂発生サイクルを評価する必要があるとし、一定軸変位振幅下で局部座屈後の亀裂発生を評価する実験式を提案している^{3)~5)}。

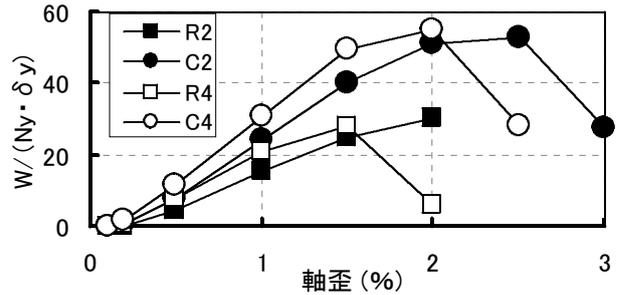


図-6 エネルギー吸収性能

$$n_c = c_1 \cdot \exp(c_2 \cdot A_{2D}) \quad (1)$$

ここに、 n_c ：亀裂発生までの加力サイクル数、 A_{2D} ：鋼管外径の2倍長に対する危険断面の曲げ圧縮側最外縁歪、 c_1, c_2 ：実験定数である。(1)式の問題点として、変位振幅がごく小さい場合、局部座屈発生が遅延し亀裂発生サイクル数が(1)式の予測をかなり超えること、全体座屈を生じる部材を対象とした実験式であり、本実験のように全体座屈を生じない場合に適用が困難なことが挙げられる。

そこで、本研究においては、亀裂発生までの加力サイクル数 n_c を、 A_{2D} ではなく、試験体全長に対する軸歪の全振幅 A_L ($\varepsilon \times 2$)の関数とし、変位振幅が小さい場合も近似できる簡便な式とした。

$$n_c = c_1 \cdot A_L^{c_2} \quad (2)$$

ここに、 c_1, c_2 ：実験定数である。なお、定数の回帰には、文献^{3), 4)}の実験資料を用いた。

(2)式による定変位振幅下の亀裂発生サイクル数の例($D/t=30, L_k/D=10$ の場合)を図-7に示す。また、(1)式、(2)式の実験定数($D/t=30, L_k/D=5$ の場合)を表-4に示す。

6.2 漸増振幅下の鋼管亀裂発生サイクル数

変位振幅が漸増する場合は、Minerによる累積損傷則(3)式を適用することとした¹⁾。

$$D(m) = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n_{ci}} = 1 \quad (3)$$

ここに、 n_i ：ある変位振幅レベルでの加力サイクル数、 n_{ci} ：その振幅レベルでの亀裂発生サイクル数、 m ：各種振幅レベルの個数である。Miner則では、 $D(m)$ を累積損傷率とし、これが1に達したときに亀裂が生じるとする。

図-8(a)は、(1)式、(2)式を用いて、文献³⁾の実験資料のうち、荷重条件が漸増振幅の試験体(L_k/D=10の場合)について、亀裂発生サイクル数を評価したものである。(1)式による計算値は、実験結果に対して大きく安全側となっている場合がある。一方、(2)式による計算値は、多少の誤差はあるものの、概ね安全側でより精度良く実験値を評価できているといえる。

図-8(b)は、(2)式を用いて本実験の亀裂発生サイクル数を評価した結果である。なお、c₁、c₂の値は表-4によった。L_k/D=2のR2、C2は精度良く結果を評価しているが、L_k/D=4の試験体、特にR4が若干危険側を示した。これは、試験部両端の支持条件、軸歪の測定長さ、およびL_k/D

表-4 実験定数

	(1)式		(2)式	
	c1	c2	c1	c2
円形	60	-29	11	-17
角形	0.0105	-1.96	0.130	-1.14

注) D/t=30, L_k/D=5

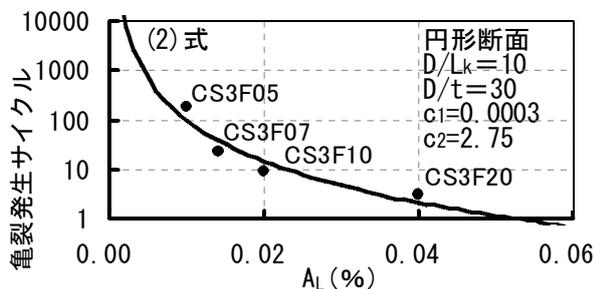
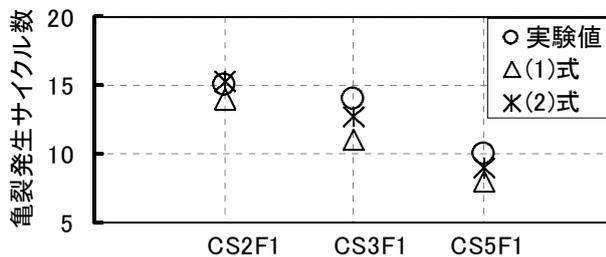
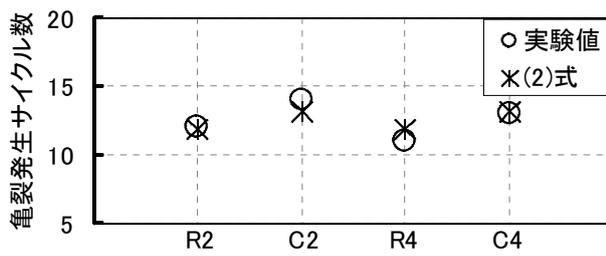


図-7 亀裂発生サイクル数



(a) 文献³⁾



(b) 本研究

図-8 鋼管亀裂発生サイクル数

が文献³⁾、⁴⁾と本実験で異なることによると考えられる。

7. まとめ

角形および円形CFT部材の圧縮引張正負交番繰返し荷重実験を行い、以下の知見を得た。

円形CFT部材は鋼管の拘束効果により、引張側、圧縮側ともに高い変形性能を示した。ただし、引張側の耐力は、鋼管亀裂の伸展により急激に低下した。また、座屈長さ断面成比が大きい場合は小さいと比較して、引張側、圧縮側ともに、最大耐力以降、早期に耐力が低下した。

円形CFT部材は、角形CFT部材と比較して、軸歪1.0%以上の大変位振幅において、より高いエネルギー吸収性能を示した。鋼管の局部座屈や亀裂発生により、エネルギー吸収量が減少した。

一定振幅下における亀裂発生サイクル数を評価する修正式を、試験体全長に対する軸歪の全振幅の関数として提案した。これに基づく累積損傷則により、漸増振幅繰返し軸方向力を受けるCFT部材の亀裂発生サイクル数が精度良く評価できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，1997.10
- 2) 福島正樹・村山双美・土井希祐・尹航：変動軸力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の静加力実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28-2，pp1309～1314，2006.7
- 3) 河野昭彦・松井千秋ほか：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性能に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第482号，pp131～140，1996.4
- 4) 河野昭彦・松井千秋ほか：繰返し軸方向力を受けるコンクリート充填角形鋼管部材の座屈挙動とエネルギー吸収性能に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第504号，pp111～117，1998.2
- 5) 河野昭彦・松井千秋ほか：実大コンクリート充填角形鋼管の繰返し局部座屈破断に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第536号，pp163～167，2000.10
- 6) 加藤勉：曲げと圧縮を受けるコンクリート充填鋼管柱の耐力，変形性能，日本建築学会構造系論文集，第477号，pp157～166，1995.11