

# 論文 一定軸力下で正負漸増繰返し载荷を受ける MFAS-CFT 柱の構造性能

西村 拓真\*1・城戸 将江\*2・姜 優子\*3・陶山 裕樹\*4

**要旨:** 浮遊選鉱法によって未燃炭素を除去した改質フライアッシュスラリー (MFAS) を混合した環境配慮型コンクリートの CFT への適用の可能性があることが, MFAS の混合方法, 幅厚比, 径厚比を実験変数とした短柱圧縮試験により確認された。本研究では MFAS コンクリートを柱部材に適用した場合の構造性能を明らかにすることを目的とし, 一定軸力下における正負漸増繰返し水平力を受ける CFT 柱の構造実験を行った。水平力-部材角関係など基本的な構造性能を示すとともに, 保有変形性能として限界部材角および累積塑性回転角を求め, これらを既往の CFT 柱の実験結果と比較したところ, 耐力, 変形性能ともに小さかった。

**キーワード:** CFT, フライアッシュ, 浮遊選鉱法, 変形性能

## 1. はじめに

石炭灰の中でもフライアッシュは高性能なコンクリート用混和材であることが認められている。第4著者らは低品質フライアッシュのコンクリート用混和材としての利用拡大を目的とし, 浮遊選鉱法による品質改善および品質安定化手法の開発・検討を行い, 未燃炭素除去装置を開発している<sup>1)</sup>。JIS 規格に満たない低品質フライアッシュを浮遊選鉱法により改質水準を強くすることで, 良質なフライアッシュに改質し, 改質したフライアッシュを使用したコンクリートは, 普通コンクリートの力学性状と同様の傾向を示すことが確認されている<sup>2)~4)</sup>。その改質したフライアッシュを用いたスラリー (以下 MFAS と略す, MFAS: Modified Fly Ash Slurry) を混合したコンクリートの構造材への適用を検討するため, MFAS 混合コンクリートを用いたコンクリート充填鋼管柱 (以後 CFT 柱) に関する実験を行ってきた<sup>5)~7)</sup>。角形断面, 円形断面に対し, MFAS の混合方法, 幅厚比, 径厚比を実験変数として実験を行い, 基礎的な力学的性状を明らかにするとともに, 既往の研究で提案されている軸力-軸方向ひずみモデル<sup>8)</sup>との対応について考察を行うことで, MFAS 混合コンクリートの CFT 柱への適用の可能性を確認してきた。しかし, これまでに行われた実

験は全て短柱圧縮実験であり, 曲げおよびせん断に関する実験は行われていない。

本研究は, MFAS 混合コンクリートを用いた, 座屈長さ・断面せい比  $l_k/D=14$  の円形 CFT 柱で, 一定軸力下で正負漸増繰返し载荷を行い, その挙動を確認することを目的とし, 曲げせん断実験を行ったものである。さらに, 普通コンクリートを用いた既往の円形 CFT 柱の実験結果<sup>9)</sup>から得られた限界部材角と本研究の限界部材角との比較を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験計画

一定軸力  $N$  と繰返し水平力  $Q$  を受ける CFT 柱の構造性能を調べるために, 図-1 に示す材長  $L$  で一端固定, 他端自由の片持ち柱を設定し, 円形 CFT 長柱の曲げせん断実験を行った。水平力  $Q$  は正負漸増繰返し载荷とし, 柱の部材角  $R (= \delta/L, \delta: 柱頭の水平変位)$  の 0.25% を初期値とし, 0.25% 刻みで 4.0% まで増加させ, 各変位振幅で 4 回ずつ正負交番の繰返し水平力载荷を行った。図-2 に载荷プログラムを, 表-1 に試験体の諸量を示す。試験体数は 1 体で軸力比  $n (= N/N_0, N_0 = s_A \cdot s_{\sigma_y} + c_A \cdot c_{\sigma_B})$ ,  $s_A$ : 鋼管の断面積,  $c_A$ : コンクリートの断面積,  $s_{\sigma_y}$ : 鋼管の降伏応力度,  $c_{\sigma_B}$ : コンクリートの圧縮強度) は 0.3

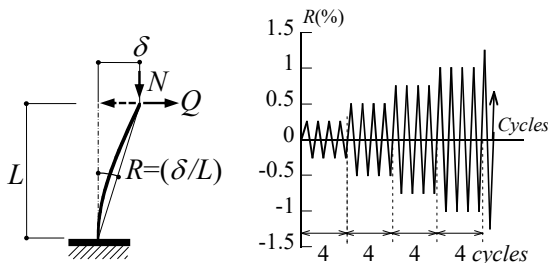


図-1 荷重条件 図-2 载荷プログラム

表-1 試験体一覧

試験体名	$l_k/D$	軸力比 $n$	圧縮耐力 $N_0$ (kN)	軸力 $N$ (kN)	$c_{\sigma_B}$ (N/mm <sup>2</sup> )
LD14n30C	14	0.3	1953	586	58.0

LD14 座屈長さ・断面せい比(14)      n30 軸力比(0.3)      C 正負漸増繰返し载荷

\*1 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 大学院生 (学生会員)

\*2 北九州市立大学 国際環境工学部 建築デザイン学科 教授 工博 (正会員)

\*3 九州産業大学 建築都市工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*4 北九州市立大学 国際環境工学部 建築デザイン学科 准教授 工博 (正会員)

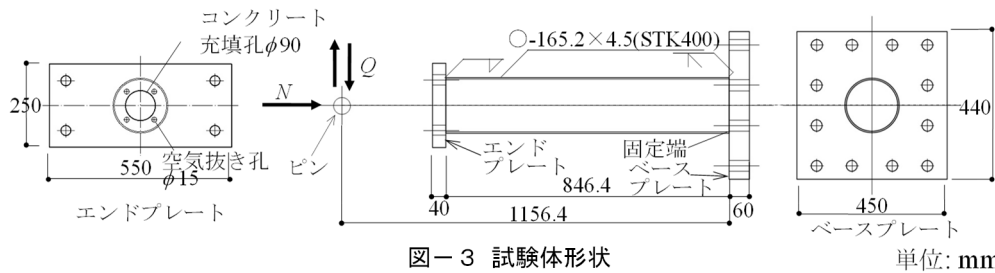


図-3 試験体形状

単位: mm

表-2 鋼管実測寸法

径 $D(\text{mm})$	板厚 $t(\text{mm})$
165.3	4.22

表-3 引張試験結果

降伏 応力度 $s\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	引張 強さ $s\sigma_u(\text{N/mm}^2)$	降伏比 $s\sigma_y/s\sigma_u(\%)$	破断 伸び $EL(\%)$	ヤング 係数 $sE(\text{N/mm}^2)$	降伏 ひずみ $\epsilon_s(\%)$
391	478	81.8	31.4	$2.25 \times 10^5$	0.173

表-4 コンクリート調査表およびフレッシュ性状

調査						フレッシュ 性状		
W/C (%)	W/(C+F) (%)	単位重量( $\text{kg/m}^3$ )				空気量 (%)	スラン プ (cm)	
		W	C	FA	S			G
56.7	38.6	170	300	140	858	804	5.7	21.0

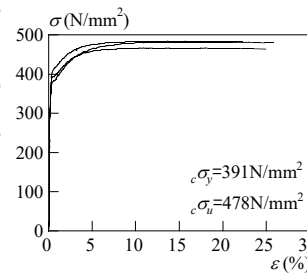


図-4 鋼管  
応力-ひずみ関係

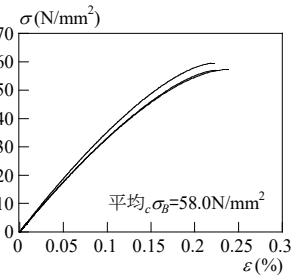


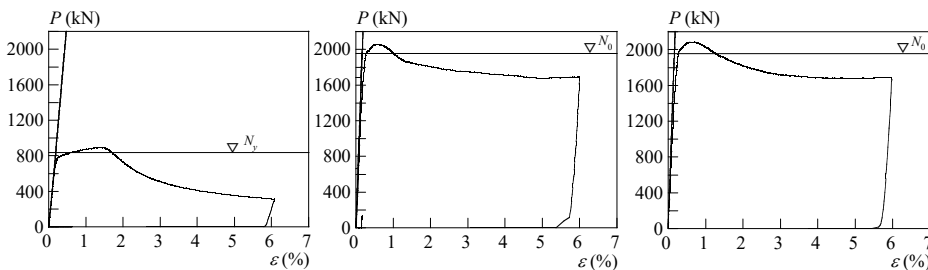
図-5 コンクリート  
応力-ひずみ関係

表-5 コンクリート圧縮試験結果

材齢 (日)	コンクリート 圧縮強度 $c\sigma_B(\text{N/mm}^2)$	圧縮強度時 ひずみ $c\epsilon_u(\%)$	ヤング係数 $E(\text{N/mm}^2)$
7	35.5	0.213	$2.96 \times 10^4$
28	51.3	0.218	$3.43 \times 10^4$
55	58.0	0.230	$3.57 \times 10^4$
91	61.9	0.227	$3.69 \times 10^4$

表-6 短柱圧縮試験結果

試験体名	$c\sigma_B$ ( $\text{N/mm}^2$ )	最大荷重 $P_{max}(\text{kN})$	$P_{max}/N_y$ $P_{max}/N_0$	最大荷重時の ひずみ $\epsilon_u(\%)$
中空	—	891.3	1.07	1.06
CFT1	58.0	2056	1.05	0.59
CFT2		2084	1.07	0.67

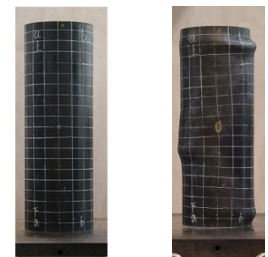


(a) 中空鋼管

(b) CFT1

(c) CFT2

図-6 荷重-ひずみ関係



(a) 実験前 (b) 実験後

図-7 CFT 試験体実験前後写真

とした。载荷プログラムは後に比較するために、文献9)と同じものとした。圧縮耐力  $N_0$  は、引張試験により得られた鋼管の降伏応力度  $s\sigma_y$  とコンクリートシリンダー圧縮試験により得られたコンクリート強度  $c\sigma_B$  を用いて算定した。

## 2.2 試験体

試験体の形状を図-3に、鋼管の実測寸法を表-2に示す。断面形は、 $\text{O}-165.2 \times 4.5$  の円形鋼管 STK400 を使用した。試験体の長さ  $L$  はベースプレート上端からピン位置まで 1156.4mm であり、座屈長さ・断面せい比は  $l_0/D=14$  である。鋼管の自由端側には厚さ 40mm のエンドプレート、固定端側には厚さ 60mm のベースプレートを溶接し

た。コンクリートの充填は試験体上部にあるコンクリートの注入口より行い、エンドプレート端面と充填コンクリートが同一面になるようキャッピングを施した。

## 2.3 材料特性

材料特性を調べるため、鋼材の引張試験、コンクリート圧縮試験および短柱圧縮試験を行った。引張試験は、鋼管より切り出した JIS12 号試験片 3 片で行った。引張試験の結果を表-3に、引張試験による代表的な応力-ひずみ関係を図-4に示す。降伏応力度  $s\sigma_y$  は、0.2% オフセット法にて求めた。鋼管は文献 10) と同じものを使用している。コンクリートの調査およびフレッシュ性状を表-4に示す。材齢 7 日から 91 日までのコンクリ

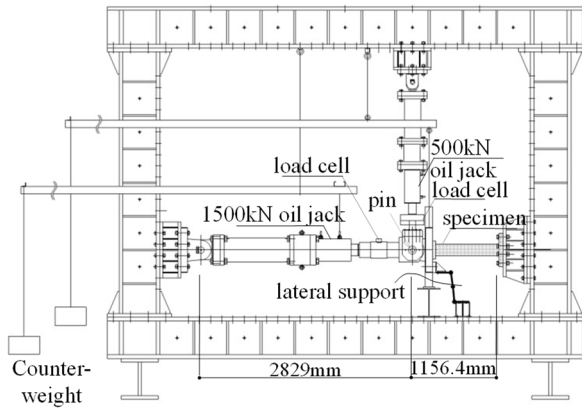


図-8 加力装置

表-7 文献9)の鋼管の機械的性質

降伏 応力度 $s\sigma_y(N/mm^2)$	引張 強さ $s\sigma_u(N/mm^2)$	降伏比 $s\sigma_y/s\sigma_u(\%)$	破断 伸び $EL(\%)$
391	477	81.9	21.9

ト圧縮強度を表-5に、代表的な応力-ひずみ関係を図-5に示す。コンクリートのヤング係数は1/3割線剛性としている。短柱圧縮試験は打設後55日後に、曲げせん断試験は56日後に行った。

表-6に短柱圧縮試験結果を、図-6に荷重-ひずみ関係、図-7に実験前後の写真を示す。表-6によれば、中空試験体の最大荷重は降伏軸力  $N_y (sA \cdot s\sigma_y \approx 831kN)$  と比較して7%ほど大きかった。CFT柱2体ともに最大荷重  $P_{max}$  および最大荷重時のひずみ  $\epsilon_{ti}$  はほぼ一致しており、最大荷重は圧縮耐力  $N_0$  と比較して6%ほど大きかった。

#### 2.4 実験方法

図-8に加力装置を示す。加力装置は、水平方向に軸力載荷の1500kNの油圧ジャッキを、鉛直方向に水平力載荷の500kNの油圧ジャッキを取り付け、ロードセルにて荷重の測定を行う。載荷は、まず一定軸力を与えたのち、水平力を加える。また、構面外変位の発生を防止するため、構面外変位拘束治具を設けている。なお、本載荷装置では部材角が生じると、軸力載荷用のジャッキが水平ではなくなるが、その角度は小さいため ( $R=4\%$  時に

表-8 最大荷重と全塑性モーメント

試験体名		$Q_{max}$ (kN)	$M_{max}$ (kNm)	$M_{pc}$ (kNm)	$M_{max}/M_{pc}$
LD14n30C	+	44.1	62.5	61.3	1.02
	-	-45.1	-63.7		1.04

0.016rad程度)、ロードセルで計測された値を軸力として用いている。水平力  $Q$  については軸力ジャッキによる鉛直方向成分(試験体に対しては水平方向成分)を水平力ジャッキのロードセルの値に追加して求めている。

#### 2.5 既往の研究

文献9)では、円形鋼管(STK400)、設計強度29.4MPaのコンクリートを用いた片持ち柱形式の試験体で、一定軸力下で図-2の載荷プログラムにて正負漸増繰返し載荷が行われている。断面径は100mmで、材長は508mmである。径厚比  $D/t$  の値は、33,39,77、軸力比  $n$  は0.2~0.8で0.1刻みとした、系統的な検討が行われている。本研究と比較的実験条件に近い、 $D/t=39$ 、 $n=0.3$ の実験結果との比較を行う。鋼管の機械的性質を表-7に示す。コンクリート強度は本研究よりも低い、鋼管の強度は概ね同程度となっている。

### 3. 実験結果

#### 3.1 実験結果概要

図-9に水平力  $Q$ -部材角  $R$  関係を示す。図中の点線は弾性直線および塑性崩壊機構直線を、△印は最大荷重の位置を、○印は視察による局部座屈発生位置を示している。右図は、 $R=0.25\%$ の1サイクル目のループと弾性直線の比較を示している。図によれば、初期剛性は計算による弾性剛性とよく対応している。履歴ループが大きく、最大耐力後の挙動も安定している。最大荷重到達後、変形が増加していくとともに、徐々に荷重が低下していることが観察され、正側と負側で大きな違いは見られなかった。普通コンクリートを用いた文献9)における軸力比  $n=0.3$ 、 $D/t=39$ の試験体は、部材角  $R=4\%$ まで紡錘形の

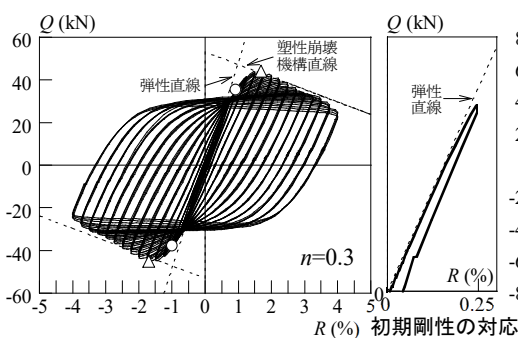


図-9 水平力  $Q$ -部材角  $R$  関係

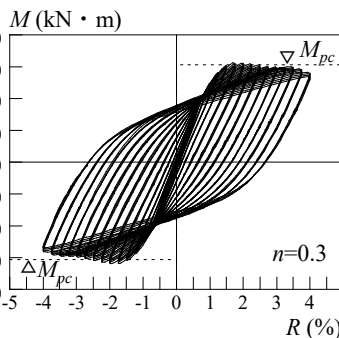


図-10 曲げモーメント  $M$ -部材角  $R$  関係

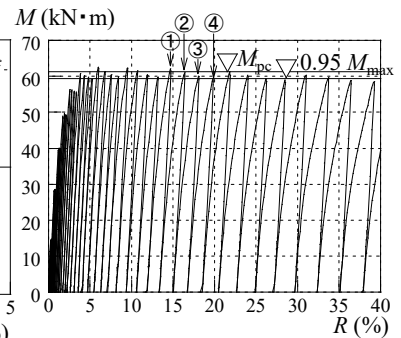


図-11 曲げモーメント-累積変形関係

安定した履歴挙動を示し、 $R=4\%$ の負側で亀裂が発生していたが、亀裂以外については本研究の試験体も同様の挙動を示していた。

表-8に、実験による最大荷重  $Q_{max}$ 、柱脚の最大曲げモーメント  $M_{max}$ 、全塑性モーメント  $M_{pc}$  の計算値を、図-10に曲げモーメント  $M$ -部材角  $R$  関係を示す。柱脚の曲げモーメントは、 $M=Q \times L + N \times \delta$  として求め、軸力  $N$  は2.4節で示したようにロードセルの値を用いた。また、 $M_{pc}$  は、鋼管およびコンクリートが全塑性状態になったものとして求めた。図中の点線は計算耐力  $M_{pc}$  を示している。試験体は全塑性モーメントに到達しているが、 $R=2.25\%$ 以降は全塑性モーメントを下回る結果となった。曲げ耐力  $M_{max}/M_{pc}$  は正側で1.02、負側で1.04となっていた。また、2.5節で示した既往の研究<sup>9)</sup>は  $M_{max}/M_{pc}$  は1.2程度となっており、それより少し小さい値となった。また、図-11に正側の履歴曲線を順次つなぎ合わせて作成した曲げモーメント累積変形関係を示している。図中①~④は、 $R=2.25\%$ におけるサイクル数を示しているが、変位振幅が大きくなると同一変位振幅において繰り返すことによる耐力劣化が見られることが分かる。

### 3.2 ひずみ $\varepsilon$ - 部材角 $R$ 関係

図-12に軸ひずみ  $\varepsilon$ -部材角  $R$  関係を示す。軸ひずみは、実験時に変位計により計測した軸縮み量を試験体のベースプレート上端からエンドプレート下端までの距離で除して求めた。繰返し荷重を受けると材長が短くなり、その値が過大となると使用性や修復性への影響が生じることが考えられることから軸ひずみの値を示している。なお、本研究では、加力したときに圧縮(引張)となる面(図3において上下)をフランジ、側面をウェブとする。図-12中に矢印で局部座屈発生点を示す。Fはフランジ面、Wはウェブ面で局部座屈が発生したことを示している。また、発生した時の部材角とその部材角内での繰返し回数をF、Wの横に示している。0.2%を超えたあたりから、軸縮み量が徐々に大きくなっていることがわかる。図-13に実験前後写真を示す。写真からも、フランジ、ウェブ共に局部座屈が発生していることがわかる。

図-14に各サイクル終了時の重心軸ひずみ度  $\varepsilon_0$  と荷重サイクル数の関係を示す。重心軸ひずみ度は、柱脚フェイスより  $D/2$  ( $=82.6\text{mm}$ ) 離れたウェブに貼付した2枚のゲージの平均値である。重心軸ひずみ度は、局所的な縮みを表すものであるが、後述する軸縮み限界部材角を定義する際に用いられている。26サイクル ( $R=1.75\%$ , 2回目)で0.2%に達し、そのあとは急激にひずみが累積していくことが観察される。

### 3.3 エネルギー吸収能力

図-11に示した柱脚部の曲げモーメント-累積部材角関係において、履歴ループの耐力が正側の最大耐力の

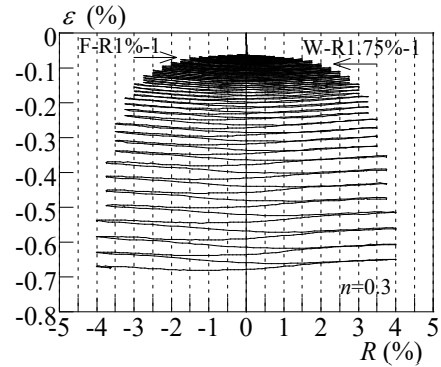
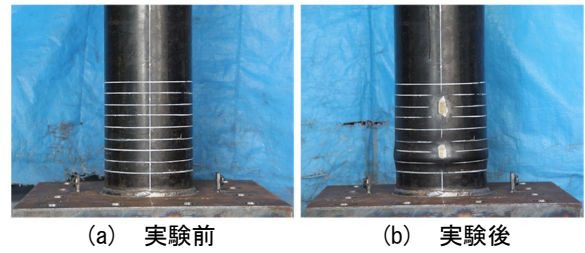


図-12 軸ひずみ  $\varepsilon$ -部材角  $R$  関係



(a) 実験前 (b) 実験後  
図-13 実験前後写真

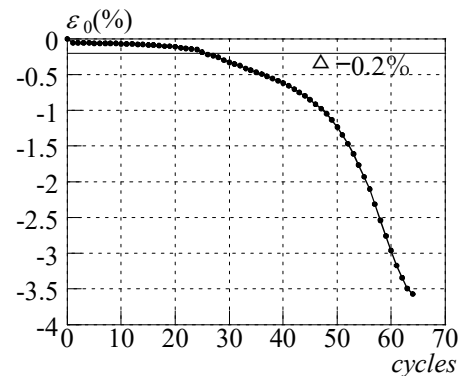


図-14 重心軸ひずみ度  $\varepsilon_0$  と荷重サイクル数の関係

95%に低下するまでの各ループの面積を足し合わせたものを、累積エネルギー吸収量  $W$  とし、累積塑性変形倍率  $\eta$  を(1)によって求めた。

$$\eta = \frac{W}{M_{pc} \cdot R_y} \quad (1)$$

ここで、 $R_y$  は下式で定義される。

$$R_y = \frac{M_{pc}}{KL^2 + NL} \quad (2)$$

式中  $N$  は軸力で、弾性剛性  $K$  は軸力の影響を考慮した曲げ剛性  $K_b$  およびせん断剛性  $K_s$  により下式で算定した。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_s}} \quad (3)$$

本研究で得られた  $W$  および  $\eta$  はそれぞれ、1.28kN・m、2.12であった。2.5節で示した既往の研究から得られた  $W$ 、 $\eta$  はそれぞれ 5.78kN・m、75.3であり累積塑性変形倍率はかなり小さな値となっている。これは、同一振幅で

4 サイクル繰返した際、比較的是やいサイクル数で最大曲げモーメントの95%に低下してしまったためである。

### 3.4 変形性能と限界部材角

保有変形性能を示す指標として、累積塑性回転角 $\Sigma\theta_{pl}$ を求めた。累積塑性回転角は、図-15に示す曲げモーメント $M$ —部材角 $R$ 関係の模式図において、 $\theta_{pi}^+$ と $|\theta_{pi}^-|$ の総和で表される。各ステップの曲げモーメント $M$ 、部材角 $R$ 、塑性回転角 $\theta_{pl}$ の変化量を $\Delta$ を付記して表すと、累積塑性回転角は式(4)で定義される。

$$\Sigma\theta_{pl} = \Sigma|\Delta\theta_{pl}| \quad (4)$$

$\theta_{pl}$ は、塑性回転角(部材角の塑性成分)であり、 $\theta_{pl}=R-M/K_m$ で定義される( $K_m=K \cdot L^2+N \cdot L$ ,  $K$ は式(3)による)。

図-16に累積塑性回転角—部材角関係を示す。

また、文献9)では、変形能力の指標として、視察により局部座屈発生が確認された部材角を局部座屈発生限界

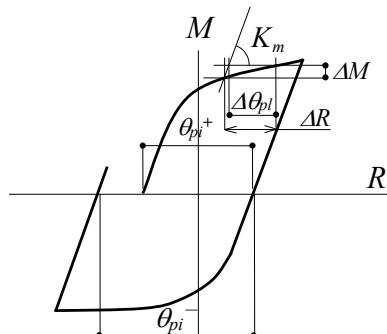


図-15 累積塑性回転角の定義

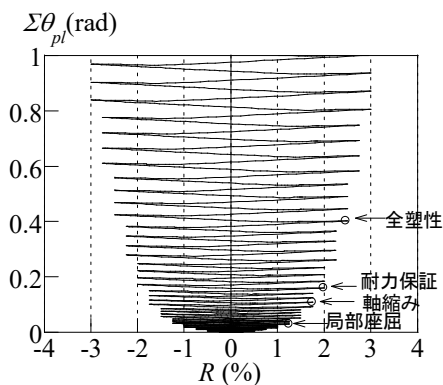


図-16 累積塑性回転角—部材角関係

表-9 限界部材角と累積塑性回転角の比較

	限界部材角 R(%)		累積塑性回転角(rad)	
	本実験	既往研究	本実験	既往研究
①軸縮み	1.75	1.50	0.109	0.136
②局部座屈	1.25	1.50	0.0292	0.0754
③耐力保証	2.00	2.50	0.160	0.684
④全塑性	2.50	4.00	0.420	2.46

部材角、軸ひずみ度が0.2%を超える部材角を軸縮み限界部材角、柱脚の断面のモーメントが全塑性モーメントまで低下したときの部材角を全塑性限界部材角、せん断力—部材角関係の包絡線上で耐力が最大耐力の95%に低下したときの部材角を耐力保証限界部材角と定義し、実験結果から得られた各部材角を提示している。

表-9に本実験における限界部材角および累積塑性回転角を定義に従って求めたものを示す。全塑性部材角は、同一振幅内での荷重低下は考慮せず、同一振幅内における最大耐力が全塑性耐力を下回った場合の部材角とした。また、2.5節に示した既往の研究結果も示している。累積塑性回転角は、文献12)で示されているものを引用した。本実験における①軸縮み限界部材角は1.75%、②局部座屈発生限界部材角は1.0%、③耐力保証限界部材角は2.0%、④全塑性限界部材角は2.5%であった。文献9)における軸力比 $n=0.3$ 、 $D/t=39$ の場合の各限界部材角は①、②は1.5%、③は2.5%、④は4%である。つまり、本実験のCFT柱試験体のほうが局部座屈発生限界、耐力保証限界、全塑性限界部材角は小さい。また、累積塑性回転角についても本実験のほうが小さくなっている。文献13)では、CFT部材に予想される累積塑性変形量が示されており、例えば、耐震性能グレードが特級の場合の上限值は0.075radである。また、修復不要限界状態としては軸縮み限界が示されており、本実験の軸ひずみ限界は0.112radであるから修復不要限界状態には達しないと考えられる。

次に、CFT指針<sup>11)</sup>に水平力—部材角関係の包絡線上で耐力が最大耐力の95%に低下した時の部材角である限界部材角 $R_u$ を評価するための式が式(5)のように示されている。

$$R_u = \gamma_c \cdot \left( 8.8 - 6.7 \cdot \frac{N}{N_0} - 0.04 \cdot \frac{D}{t} - 0.012 \cdot F_c \right) \cdot \frac{1}{100} \quad (5)$$

式(5)中の $\gamma_c$ は $l_w/D \leq 10$ の場合1、 $l_w/D > 10$ の場合0.6である。 $F_c$ はコンクリートの設計基準強度で、表-5の55日強度を用いた。断面径 $D$ と板厚 $t$ に実測値を用い、 $\gamma_c=0.6$ とした場合の限界部材角の計算値は $R_u=2.72\%$ となり、実験による限界部材角2.0%は、計算による限界部材角の7割程度となった。

## 4. まとめ

一定軸力と曲げを受けるMFAS混合コンクリートを用いた円形CFT柱正負漸増繰返し载荷の実験を行い、以下の知見を得た。

1) 履歴ループが大きく安定していたが、最大曲げ耐力と全塑性耐力の比 $M_{max}/M_{pc}$ は正側で1.02、負側で1.04となり、普通コンクリートを用いた文献9)における軸力比 $n=0.3$ 、 $D/t=39$ の場合と比較すると、少

し小さい値となった。

- 2) 柱脚の曲げモーメントが最大曲げモーメントの95%に低下したときの累積エネルギー吸収量を用い累積塑性変形倍率を求めた。また、変形性能として、累積塑性回転角、軸縮限界部材角、局部座屈発生限界部材角、耐力保証限界部材角、全塑性限界部材角を実験結果より求め、既往の研究結果と比較した。その結果、普通コンクリートを用いた既往の研究結果よりも、軸縮限界部材角を除く限界部材角、累積塑性回転角ともに小さくなっていた。
- 3) CFT 指針<sup>11)</sup>の限界変形部材角評価式により求めた計算値と実験値を比較すると、実験値は計算値の7割程度の値となった。

今後は試験体数を増やし、MFAS コンクリートを用いた CFT 柱の耐力や変形性能について明らかにしていく必要がある。

### 謝辞

本研究は令和3年度北九州市立大学環境技術研究所研究プロジェクト(重点研究推進支援プロジェクト)「浮遊選鉱法の適用による木質バイオマス燃焼灰を混合した低炭素コンクリートの社会実装に向けての基盤構築」の助成を得て行ったものである。

北九州市立大学教授高巢幸二先生には、研究計画の段階から研究遂行に関し、多大なご指導・ご助言をいただきました。実験の遂行に当たり、北九州市立大学構造・施工講座学生、材料デザイン講座学生、EA 西村佑季子氏の協力を得た。また、本研究の一部は北九州市立大学大学院2021年度修論生安部壮一郎氏の修士論文、九州産業大学2021年度卒業生高永蒼士氏、高山大成氏、藤井基貴氏、松原秀晃氏の卒業論文である。関係各位に感謝します。

### 参考文献

- 1) 高巢幸二, 陶山裕樹, 小山田英弘: 浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未燃炭素除去およびそのフライアッシュスラリーを使用したコンクリートの特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第697号, pp.331-340, 2014.3.
- 2) 三浦和侑, 高巢幸二, 松藤泰典, 森山伸智: 浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未燃炭素除去に関する研究(その2 装置の性能検証とフライアッシュスラリーを使用したコンクリートの力学性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.755-756, 2010.7.
- 3) 吉田愛, 高巢幸二, 松藤泰典, 陶山裕樹, 小山田英弘, 嶋崎翔太: 浮遊選鉱法によるフライアッシュ中の未燃炭素除去に関する実験的研究(その8 改質フライアッシュスラリーを使用したモルタル及びコンクリートの諸特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.509-510, 2013.7.
- 4) 新村祐太, 高巢幸二, 陶山裕樹, 小山田英弘, 竹川翔馬: 浮遊選鉱法により未燃炭素を除去したフライアッシュの特性に関する研究(その2 改質水準の違いによる改質フライアッシュスラリーモルタルの諸特性), 日本建築学会九州支部研究報告, 第55号, pp.121-124, 2016.3.
- 5) 姜優子, 城戸將江, 陶山裕樹, 高巢幸二: 改質フライアッシュスラリーを混合した低炭素コンクリートのCFTへの適用可能性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.997-1002, 2017.7.
- 6) 姜優子, 城戸將江, 陶山裕樹, 高巢幸二: 改質フライアッシュスラリーを内割・外割混合した環境配慮型コンクリートを用いたCFT柱の圧縮挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1135-1040, 2018.7.
- 7) 姜優子, 城戸將江, 陶山裕樹, 高巢幸二: 改質フライアッシュスラリーを混合した環境配慮型コンクリートを用いた円形CFT短柱の圧縮挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第41巻, pp.1129-1134, 2019.6.
- 8) Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S. and Nishiyama, I.: Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.130, No.2, pp.180-188, 2004.2.
- 9) 松井千秋, 津田恵吾, 河野昭彦, 山地雄二郎, 藤永隆: コンクリート充填円形鋼管柱の構造性能と軸力制限値, 日本建築学会構造系論文集 第512号, pp.181-188, 1998.10.
- 10) 久島俊也, 城戸將江, 薄拓己, 阿部真士: 一定変位振幅繰返し载荷を受ける円形CFT長柱の曲げせん断実験, 日本建築学会九州支部報告, 第60号, pp.381-384, 2021.3.
- 11) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008
- 12) 城戸將江, 津田恵吾: コンクリート充填鋼管柱の保有変形性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第28巻, pp.1327-1332, 2006.6.
- 13) 日本鋼構造協会: JSSC テクニカルレポート CFT柱を用いた鉄骨骨組の動的耐震設計法ガイドライン, 2006