

# 論文 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

姜 優子<sup>\*1</sup>・城戸 将江<sup>\*2</sup>・陶山 裕樹<sup>\*2</sup>・高巢 幸二<sup>\*3</sup>

**要旨**：既往の研究において、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確認された。そこで、円形鋼管の径厚比を変動因子とし CFT 短柱圧縮試験を行い、圧縮挙動を確認した。その結果、本年度の円形 CFT 短柱圧縮試験において、MFAS 混合コンクリートの耐力および変形性能は、径厚比が異なっても本実験の変数の範囲内であれば、普通コンクリートと同様に拘束効果を考慮して評価することが可能であることが確認できた。

**キーワード**：CFT, 短柱圧縮試験, フライアッシュ, 浮遊選鉱法, 径厚比

## 1. 序

筆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のために、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・検討を行っており、未燃炭素除去装置を開発した<sup>1)</sup>。既往の研究では、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を使用したコンクリートの力学性状と同様な傾向を示すことを確認している<sup>1)</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) を作成し、MFAS を混合した環境配慮型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 CFT 短柱圧縮試験を行い、MFAS 混合コンクリートの CFT への適用の可能性を確認している<sup>2), 3)</sup>。しかしながら、文

献 2), 3) では円形断面試験体は径厚比が  $D/t = 40$  のみに限定されており、径厚比が変化した場合については CFT 短柱への適用可能性の検討が行われていなかった。軸方向力を受ける円形 CFT 短柱は、拘束効果により単純累加強度よりも圧縮耐力が上昇するものとして終局耐力を評価することになっているが<sup>4)</sup>、MFAS 混合コンクリートの場合にも同様に、拘束効果を考慮した耐力評価が可能かどうか、また、最大耐力後の挙動などについても普通コンクリートと同等であるかは明らかにされていない。

そこで、本年度は円形 CFT 短柱に関する基礎資料を蓄積し、上記の問題点を明らかにすることを目的とし、MFAS 混合コンクリートを用いた円形 CFT 短柱において、径厚比を変動因子とした CFT 短柱圧縮試験を行った。

表-1 試験体一覧ならびに実測値

試験体	コンクリート			鋼管				実験年度
	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 (日)	MFAS 混合	材質	径 $D$ (mm)	板厚 $t$ (mm)	長さ $L$ (mm)	
○ S23-0	-	-	-	STK400	139.8	5.76	419.5	2018
○ S31-0					139.8	4.33	420.9	
○ S40-0					139.6	3.43	418.4	2016
○ CFT23-N52	57.1	62	無	STK400	139.9	5.76	420.1	2018
○ CFT31-N52					139.7	4.30	419.8	
○ CFT40-N52					55.1	139.6	3.30	411.0
○ CFT23-MO52	57.0	62	有	STK400	139.9	5.75	419.6	2018
○ CFT31-MO52					139.7	4.29	419.8	
○ CFT40-MO50					50.9	139.6	3.40	419.0

\*1 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)

\*2 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 博士 (工学) (正会員)

\*3 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科教授 博士 (工学) (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1 に試験体一覧ならびに実測値を示す。本年度は CFT 短柱 4 体および中空鋼管短柱 2 体の計 6 体で実験を行った。試験体の材長は断面径の 3 倍とし、実験の変動因子は MFAS 混合の有無および径厚比である。径厚比は FA ランク<sup>3)</sup>のものを 3 種とした。試験体名には abc-de の記号を付けている。a は断面形状 (○: 円形), b は柱の仕様 (S: 中空鋼管, CFT: コンクリート充填鋼管), c は径厚比, d はコンクリートの有無および種類 (N: 普通コンクリート, MO: 外割 MFAS 混合コンクリート), e はコンクリートの設計基準強度を示している。鋼管切断面は切断後に機械加工し、コンクリート打設翌日に鋼管断面と同一面となるようにセメントペーストにてキャッピングを施した。また、試験体の材長に関して CFT 指針<sup>4)</sup>では、座屈長さが断面せいの 4 倍以下の柱を短柱と定義している。過去の短柱圧縮試験資料<sup>4)</sup>を見ると、材長を断面せいの 3 倍とすることが一般的であることから、試験体材長を断面せいの 3 倍とした。図-1 に試験体形状を示す。CFT 短柱圧縮試験は材齢 63 日に行った。

### 2.2 材料特性

材料特性を調べるため、鋼材引張試験およびコンクリートシリンダー圧縮試験を行った。鋼材引張試験は円形鋼管より切り出した JIS12 号 C 試験片により、3 片ずつ行い、平均値を取っている。鋼材引張試験結果を表-2 に示す。また、引張試験による代表的な応力-ひずみ関係を図-2 に示す。降伏応力度および降伏ひずみは、0.2% ひずみまでオフセットした各試験体の弾性係数の傾きを持つ直線と、応力-ひずみ曲線の交点の値とした。

表-3 にコンクリートの調合ならびにフレッシュ性状を示す。コンクリートは実験時に (62 日強度において) 52N/mm<sup>2</sup> となるよう調合した。MFAS は JIS 規格を満たしていないフライアッシュを、筆者らが開発した浮遊選鉱法<sup>1)</sup>により強熱減量 2% 以下に改質し、改質灰をスラリー状態で混和材としている。フライアッシュを使用することを考慮して中流動コンクリートタイプになることを想定して、昨年度まではスランプフローの目標値を 450 ± 50mm、空気量の目標値を 4.5 ± 1.0% と設定した。本年度に関しては、空気量の目標値を 3.0% ± 1.0% としている。

コンクリートの圧縮試験結果を表-4 に、代表的なコンクリートの応力-ひずみ関係を図-3 に示す。コンクリートの種類につき 3 本ずつ圧縮試験を行い、平均値をコンクリート強度としている。ヤング係数については、JIS A 1149 により算定している。圧縮試験は、材齢 7・28・62・91 日に行った。CFT 短柱圧縮試験を材齢 63 日に行ったため、前日の 62 日に強度試験を行っている。図-4 にコンクリート圧縮強度と材齢の関係を示す。MFAS 混合コンクリートは、普通コンクリートと比較して低い単位セメント

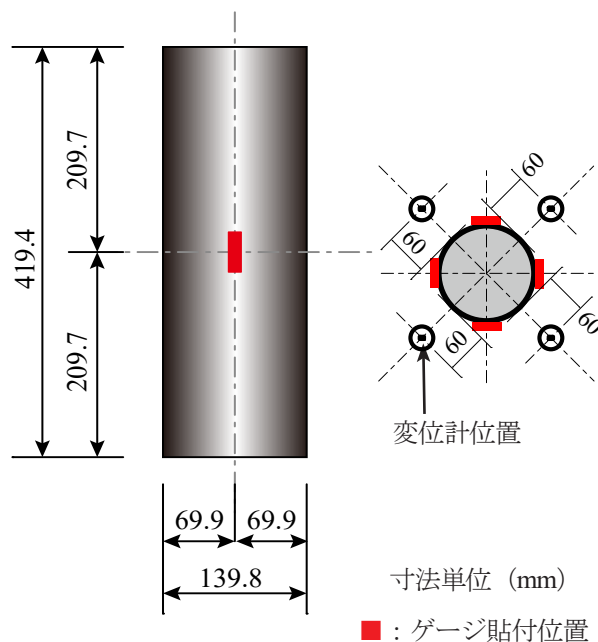


図-1 試験体形状、変位計およびひずみゲージ貼付位置

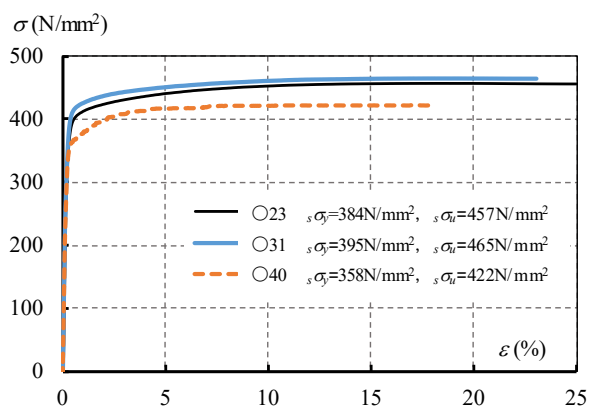


図-2 鋼材の応力-ひずみ関係

表-2 鋼材引張試験結果

	降伏応力度 $s\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ $s\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 $s\sigma_y/s\sigma_u$ (%)	破断伸び EL (%)	降伏ひずみ $\epsilon_y$ (%)	ヤング係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
○ 23	378	453	83.5	27.7	0.367	$2.26 \times 10^5$
○ 31	393	466	84.3	26.5	0.366	$2.36 \times 10^5$
○ 40	330	424	77.8	26.7	0.361	$2.05 \times 10^5$

表-3 コンクリートの調合ならびにフレッシュ性状

	調合							フレッシュ性状		
	W/C (%)	W/(C+FA) (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	フロー (cm)	空気量 (%)
			W	C	FA	S	G			
N52 (2018)	41.0	41.0	175	427	0	769	979	11.0	22.5	5.0
N52 (2017)	41.0	41.0	175	427	0	769	979	20.5	44.5	4.1
MO52	50.0	35.3	180	360	150	711	906	-	47.0	3.0
MO50	50.0	35.3	180	360	150	694	884	23.0	41.5	4.9

表-4 コンクリート圧縮試験結果

材齢 (日)	試験体	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$ (%)	$E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
7	N52(2018)	43.2	0.23	$2.99 \times 10^4$
	N52(2017)	40.6	0.21	$3.36 \times 10^4$
	MO52	37.4	0.23	$2.70 \times 10^4$
	MO50	-	-	-
28	N52(2018)	50.9	0.24	$3.12 \times 10^4$
	N52(2017)	49.8	0.22	$3.53 \times 10^4$
	MO52	50.0	0.24	$3.05 \times 10^4$
	MO50	-	-	-
62	N52(2018)	57.1	0.24	$3.31 \times 10^4$
	N52(2017)	55.1	0.23	$3.52 \times 10^4$
	MO52	57.0	0.24	$3.24 \times 10^4$
	MO50	50.9	0.22	$3.06 \times 10^4$
91	N52(2018)	60.2	0.24	$3.38 \times 10^4$
	N52(2017)	55.4	0.22	$3.66 \times 10^4$
	MO52	58.4	0.24	$3.28 \times 10^4$
	MO50	53.2	0.23	$3.21 \times 10^4$

$\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度,  $\epsilon_u$ : 圧縮強度時のひずみ  
 $E_c$ : ヤング係数

量で圧縮強度を確保でき、CO<sub>2</sub> 排出量の削減に寄与することが確認できた。一方、同強度でのヤング係数が低い傾向にあることも確認できた。

### 2.3 加力・測定方法

加力は図-5に示すように、軸方向に平押しで中心圧縮力を载荷させる静的単調载荷により行った。軸方向変位は図-1, 5に示すように、試験体断面の円周を4分割する方向に4台の変位計を設置し計測を行った。また、図-1に示すように円周を4分割する位置の試験体中央にひずみゲージを貼付し、計測を行った。局部座屈の観察は目視、カメラ等で行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 実験結果と耐力評価

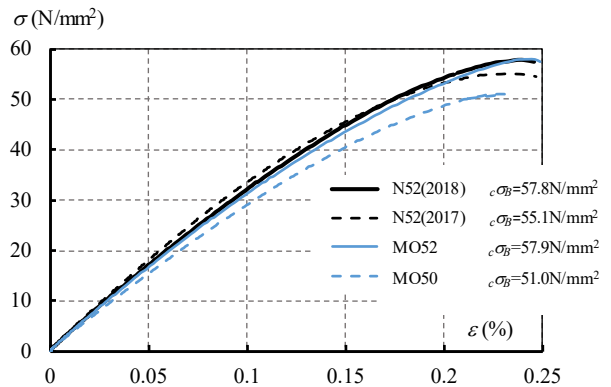


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

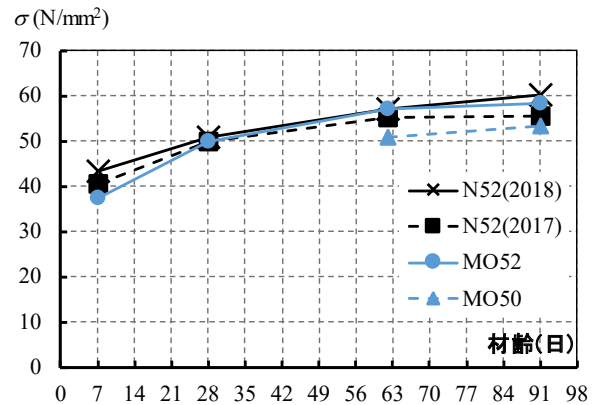


図-4 コンクリート圧縮強度-材齢関係

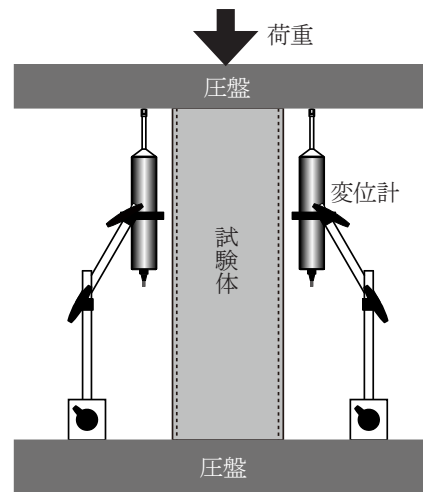


図-5 加力装置

表-5 実験結果一覧

試験体	${}_{ex}P_{max}$ (kN)	$N_0$ (kN)	$\frac{{}_{ex}P_{max}}{N_0}$	$\delta_u$ (mm)	$\varepsilon_u$ (%)	$K_{ex}$ ( $\times 10^3$ kN)	$K_{cal}$ ( $\times 10^3$ kN)	$\frac{K_{ex}}{K_{cal}}$
○ S23-0	1038	916	1.13	8.50	2.03	520	549	0.95
○ S31-0	777	724	1.07	5.59	1.33	391	435	0.90
○ S40-0	558	484	1.15	5.38	1.28	319	302	1.06
○ CFT23-N52	1881	1656 (1881)	1.14 (1.00)	4.10	0.98	948	976	0.97
○ CFT31-N52	1648	1489 (1658)	1.11 (0.99)	3.07	0.73	837	878	0.95
○ CFT40-N52	1464	1233 (1332)	1.19 (1.10)	3.77	0.86	734	780	0.94
○ CFT23-MO52	1904	1654 (1878)	1.15 (1.01)	4.16	0.99	889	968	0.92
○ CFT31-MO52	1672	1486 (1655)	1.12 (1.01)	3.28	0.78	731	869	0.84
○ CFT40-MO50	1303	1185 (1291)	1.10 (1.01)	2.91	0.69	735	722	1.02

${}_{ex}P_{max}$ : 実験値最大荷重,  $N_0$ : 単純累加強度 ( $N_0 = {}_sA \cdot \sigma_y + {}_cA \cdot \sigma_B$ ,  ${}_sA$ : 鋼管の断面積,  $\sigma_y$ : 鋼管の降伏強さ,  ${}_cA$ : コンクリートの断面積,  $\sigma_B$ : コンクリートのシリンダー強度), ( ) 内は式(1)を用いた拘束効果および寸法効果を考慮した計算値,  $\delta_u$ : 最大荷重時縮み,  $\varepsilon_u$ : 最大荷重時ひずみ,  $K_{ex}$ : 実験値初期剛性,  $K_{cal}$ : 計算値初期剛性 (単純累加,  $K_{cal} = P/\varepsilon = {}_sA \cdot E_s + {}_cA \cdot E_c$ )

(a) 実験結果

実験結果一覧を表-5に示す。図-6に中空鋼管の応力 $\sigma$ -軸ひずみ $\varepsilon$ 関係を、図-7, 8に各試験体の軸力 $P$ -軸ひずみ $\varepsilon$ 関係を示す。ひずみは変位計により測定された軸方向縮量を、加力前の試験体長さで除した値を用いている。図-7に示す充填内容が同じ場合であるCFT試験体の縦軸は、軸力を単純累加強度 $N_0 (= {}_sA \cdot \sigma_y + {}_cA \cdot \sigma_B)$ で除して耐力比として表している。なお、表-5に示す実験による初期剛性は、鋼管に貼付したひずみゲージの全平均が、 $300\mu \sim 600\mu$ のときの値を用いて求めたものであり、○CFT31-MO52ではやや実験値が低くなっているが、全体的に概ね計算値と一致していた。

図-6の中空鋼管の場合、径厚比40および31において、最大応力時のひずみはほぼ同じ値を示しているが、径厚比が小さい23では、最大応力時のひずみが大きくなっている。また、図-7によれば、CFT短

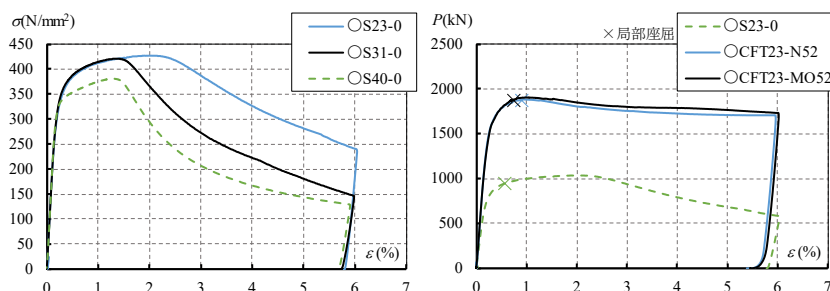


図-6 中空鋼管の応力-軸ひずみ関係

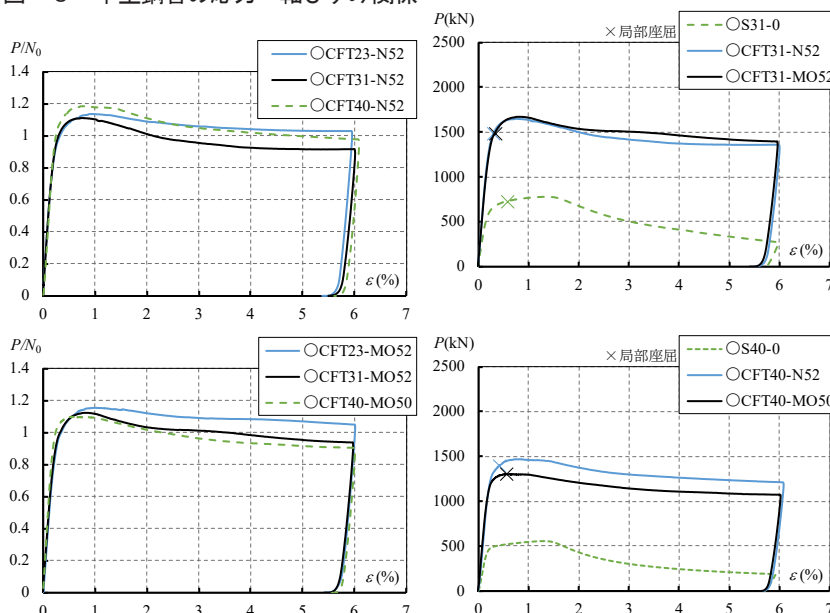


図-7 軸力-軸ひずみ関係 (充填内容が同じ場合)

図-8 軸力-軸ひずみ関係 (径厚比が同じ場合)



柱においては普通コンクリートおよびMFAS 混合コンクリートのどちらの場合においても、最大荷重まではほぼ同じ履歴となり、径厚比の影響は見られなかった。最大荷重以降は、径厚比が小さい方が最大荷重以降の荷重の低下が緩やかになるということが確認できた。MFAS 混合コンクリート CFT においては径厚比が小さくなると最大荷重時のひずみ  $\epsilon_u$  も大きくなる傾向がみられたが、普通コンクリート CFT においては、CFT31 の場合のほうが CFT40 と比較して、 $\epsilon_u$  の値が小さくなっていた。また、図-8 によれば径厚比が同じ場合、普通コンクリート CFT および MFAS 混合コンクリート CFT はほぼ同様の履歴を示している。CFT 試験体全てにおいて、最大荷重以前に局部座屈が発生していた。このことから、MFAS 混合コンクリートを用いた CFT 短柱の履歴は、普通コンクリートを用いたものとほぼ同等と言える。

実験終了後の状態を写真-1 に示す。普通コンクリートの場合、径厚比 23 および 31 の上部、中部、脚部と局部座屈が発生しているが、径厚比 40 においては上部のみに局部座屈が発生しており、中部および脚部に局部座屈の発生は見られなかった。MFAS 混合コンクリートの場合、逆に径厚比 40 は上部、中部、脚部と局部座屈が発生しているが、径厚比 23 および 31 においては、上部のみに局部座屈が発生しており、中部および脚部に局部座屈の発生は見られなかった。

### (b) 耐力評価

CFT 指針<sup>4)</sup> 第一編に円形 CFT 短柱の終局耐力  $N_{cul}$  として次式が示されている。

$$N_{cul} = {}_c N_c + (1 + \xi) {}_s N_c \quad \dots (1)$$

ここで、

$$N_c = A \cdot \gamma_u \cdot \sigma_B$$

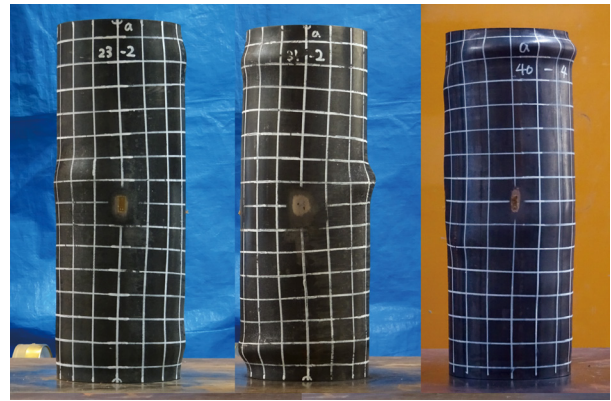
$${}_s N_c = {}_s A \cdot \sigma_y$$

$\gamma_u$ : コンクリートの強度低減係数

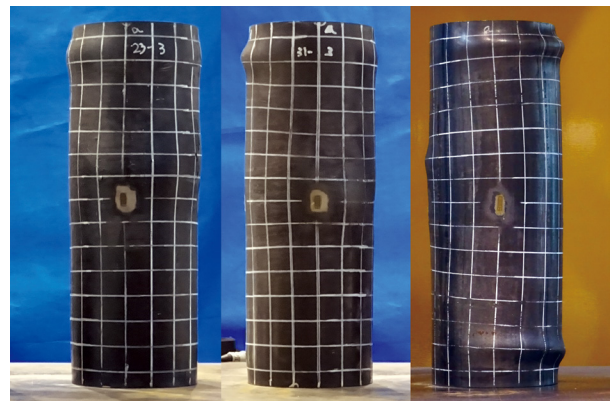
$D_c$ : コンクリートの径

係数  $\xi$  は 0.27 であり、単純累加強度  $N_0$  は  $\xi = 0$ 、 $\gamma_u = 1.0$  としたときの値である。コンクリートの寸法効果を考慮する  $\gamma_u$  は文献 6) の式を用い、 $1.67D_c^{-0.112}$  で求めた。本実験では  $\gamma_u$  は約 0.97 である。

表-5 によれば、実験による最大荷重は、径厚比および充填内容に関わらず拘束効果を考慮しない単純累加強度の値の 1.1 ~ 1.2 倍程度の値になっている。○CFT40-N52 を除く CFT 試験体においては、拘束効果を考慮すると実験値と計算値はほぼ同じ値となった。このことより、MFAS 混合コンクリートを用いた場合において、普通コンクリートと同様に最大荷重は拘束効果を考慮した累加強



○ CFT23-N52    ○ CFT31-N52    ○ CFT40-N52



○ CFT23-MO52    ○ CFT31-MO52    ○ CFT40-MO52

写真-1 実験終了後

度にて評価することができる。

### 3.2 軸力-軸ひずみ関係の検討

ここで、変形性能について、文献 6) に示されている方法にて解析を行う。コンクリートおよび鋼管の応力-ひずみ関係を仮定し、それらを用いて CFT 柱の軸力-ひずみ関係を求める。コンクリートは鋼管の拘束による耐力上昇と変形性能の改善効果を取り込んだ崎野・孫モデル<sup>7)</sup> である。解析において、コンクリートの圧縮強度はシリンダー圧縮試験の 62 日強度を使用し、ヤング係数、圧縮強度時のひずみは文献 6) に示されている式により算定した値を用いている。また、 $\gamma_u$  も考慮している。鋼管は完全弾塑性型で、鋼管の応力が  $\beta_{uc} \cdot \sigma_y$  ( $\beta_{uc} = 0.89$ ) で一定値となるモデルである。この時の  ${}_s \sigma_y$  は、各径厚比の中空鋼管圧縮試験の応力-ひずみ関係から、初期ヤング係数  $E_s$  を求め、 $E_s$  を 0.2% オフセットした直線と交わる点を  ${}_s \sigma_y$  とし、その値を用いて算定した。 $E_s$  は鋼管に貼付したひずみゲージの全平均が、 $300\mu \sim 600\mu$  のときの変位から算定した軸方向ひずみの値と荷重の値を用いて求めたものである。

図-9 に解析による軸力-軸ひずみ関係を、実験結果とともに示す。○CFT40-N52 以外は、概ね精度よく評価できており、MFAS 混合のコンクリートの場合であっても、崎野らの解析方法<sup>9)</sup> で変形性能を評価することが可能と考えられる。○CFT40-N52 のみ実験の最大荷重が解析値と

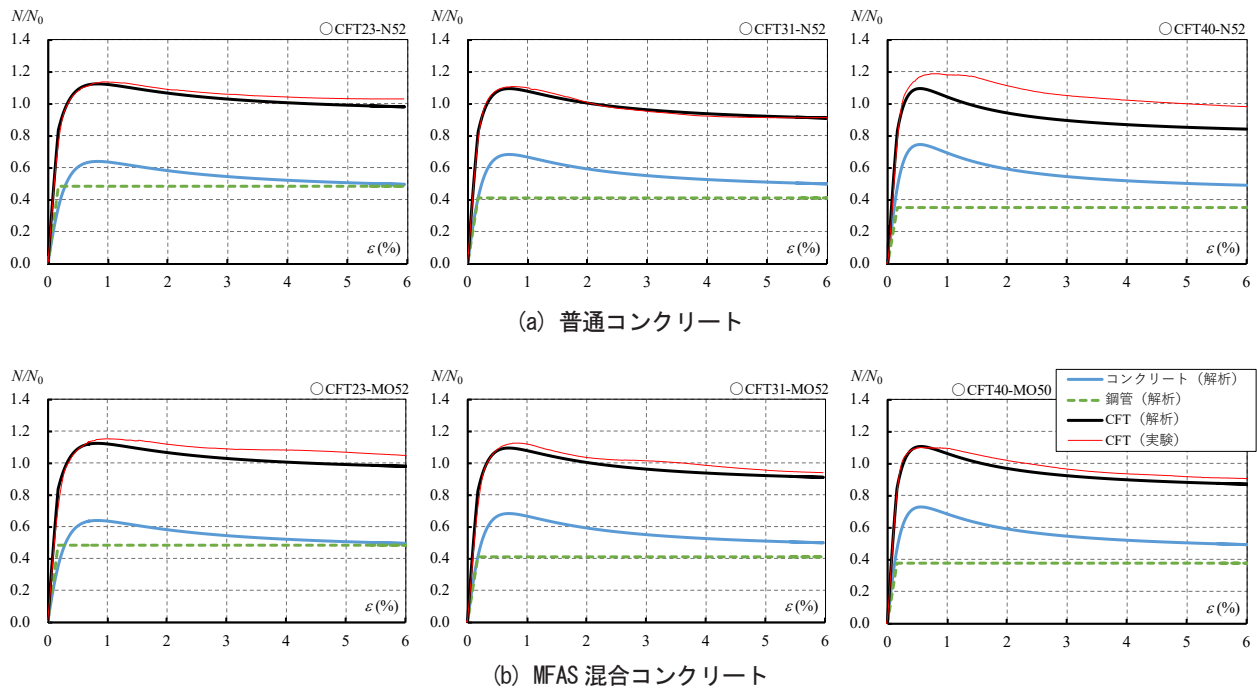


図-9 解析による軸力-軸ひずみ関係

比較してやや大きな値を示している。この試験体は径厚比が大きいものであり、コンクリート単体の負担軸力の影響が、他の試験体に比べると大きくなるため、コンクリートの材料特性や打込みなどの複雑な要因が影響することが考えられる。現時点では原因を検証できていないため、この点については今後の研究課題である。

#### 4. まとめ

本年度の円形CFT短柱圧縮試験において、MFAS混合コンクリートの耐力および変形性能は、径厚比が異なっても本実験の変数の範囲内であれば、普通コンクリートと同様に拘束効果を考慮して評価することが可能であることが確認できた。しかし、MFAS混合コンクリートは1種類の設計基準強度しか実験を行っておらず、コンクリート設計基準強度を変動因子とした場合の影響など、まだ不明な点は多く、今後も基礎資料の蓄積が必要であると考えられる。

#### 謝辞

本研究は平成30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）「北九州市における改質フライアッシュスラリー普及促進コンソーシアム設立に向けての基盤構築」の助成を得て行ったものである。またこの実験は、九州産業大学飯尾駿一郎君、和田廉弥君の卒業論文であり、実験の遂行に当たり、北九州市立大学構造施工講座、材料デザイン講座の学生および同大学EA三倉英史氏、Didit Noviant氏に協力を得た。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) 姜優子, 城戸將江, 高巢幸二, 陶山裕樹: 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, 日本コンクリート工学会年次論文集, vol.39, No.2, pp.997-1002, 2017.7.
- 3) 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.
- 4) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008.10.
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課監修ほか: 2015年版建築物の構造関係技術基準解説, 2015.6.
- 6) Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S. and Nishiyama, I.: Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, Volume 130, Number2, pp.180-188, Feb.2004.
- 7) 崎野 健治, 孫 玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.461, pp.95-104, 1994.7