

論文 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

姜 優子^{*1}・城戸 将江^{*2}・陶山 裕樹^{*2}・高巢 幸二^{*3}

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）を外割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を確認できた。そこで、MFAS の混合方法を変え、内割混合した環境配慮型コンクリートを用いた CFT 短柱圧縮試験を行い、圧縮挙動を確認した。その結果、CFT 短柱において幅厚比が同じ場合、普通コンクリート CFT と MFAS 内割・外割混合コンクリート CFT は、ほぼ同様の履歴を示し、角形鋼管においては、MFAS 内割混合コンクリートを用いた場合、外割混合コンクリートを用いた場合よりも最大荷重以降の耐力低下は少なかったことなどが確認できた。

キーワード：CFT, 短柱圧縮試験, フライアッシュ, 浮遊選鉱法

1. 序

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¹⁾。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 外割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できた²⁾。

そこで本年度は、MFAS の混合方法を内割とした環境配慮型コンクリートを用いた CFT 短柱圧縮試験を行い、

MFAS 混合した環境配慮型コンクリートの圧縮挙動を確認することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧ならびに鋼管実測値を示す。本年度は CFT 短柱 6 体で実験を行った。試験体の材長は断面せいの 3 倍とし、実験の変動因子は MFAS 混合の有無、鋼管形状および幅厚比（または径厚比。以下、幅厚比で統一する）である。MFAS の混合割合に関しては、内割混合においてはセメント重量置換で 15%、外割混合においては MFAS を 150kg/m³ とし、一般的なものより多めの設定で環境負荷低減を考慮した。幅厚比は FA, FB ランク³⁾のも

表-1 試験体一覧ならびに鋼管実測値

試験体	MFAS 混合	鋼管						実験年度
		材質	幅・径 D (mm)	板厚 t (mm)	長さ L (mm)	外径 R_o (mm)	内径 R_i (mm)	
□ CFT25-MO36	有 (外割)	STKR400	150.7	5.54	448.5	13.1	7.6	2016
□ CFT33-MO36			150.0	4.12	448.4	10.1	6.0	
○ CFT40-MO36		STK400	139.6	3.40	419.0	-	-	
□ CFT25-N52	無	STKR400	150.2	5.63	450.0	13.0	7.4	2017
□ CFT33-N52			150.5	4.21	449.2	10.1	5.8	
○ CFT40-N52		STK400	139.6	3.30	411.0	-	-	
□ CFT25-MI52	有 (内割)	STKR400	150.4	5.65	450.0	12.9	7.3	
□ CFT33-MI52			150.5	4.24	449.5	10.2	6.0	
○ CFT40-MI52		STK400	139.7	3.29	414.6	-	-	

*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）

のを1種ずつとし、径厚比はFAランク³⁾のものを1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(□:角形, ○:円形), bは柱の仕様(CFT:コンクリート充填鋼管), cは幅厚比, 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, MI:内割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モルタルにてキャッピングを施した。また、試験体の材長に関してSRC規準⁴⁾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⁵⁾を見ると、材長を断面せいの3倍としていることが一般的であることから、試験体材長を

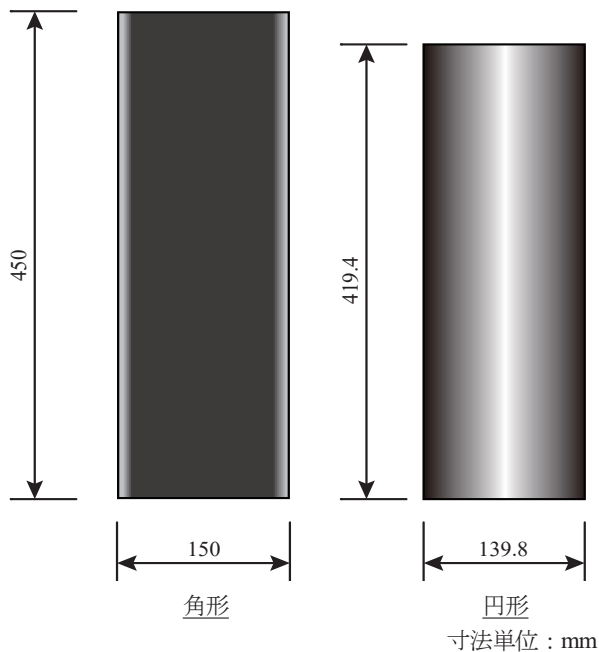


図-1 試験体形状

断面せいの3倍とした。表-1に示す試験体の実測値は、鋼管の実測寸法の平均値である。角形鋼管のR部の外径・内径は自作のゲージにて測定し、内径は板厚の平均値を外径から減じた値とした。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。鋼材引張試験は角形鋼管平板部分より切り出したJIS1号A試験片により、円形鋼管についてはJIS12号C試験片により、3片ずつ行った。鋼材引張試験結果を表-2に示す。□33の鋼管に関しては、引張試験片のうち1本の破断位置が、標点間の中央から標点距離の1/4を超えたため、残り2本の引張試験片の平均値としている。引張試験による代表的な応力-ひずみ関係は文献2)を参照されたい。

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。コンクリート設計基準強度については、既往の研究では設計基準強度36N/mm²として調合した普通コンクリートと、同じ水ポルトランドセメント比でMFASを外割混合したMFAS混合コンクリート作成したところ、強度上昇がみられ、62日強度で普通コンクリートの1.36倍の50.9N/mm²となった。そこで、本年度は62日強度で既往のMFAS外割混合コンクリートと同程度の強度となるように、設計基準強度52N/mm²で普通コンクリートを調合した。また、52N/mm²の普通コンクリートと水結合材比が同じになるようにMFASを内割混合している。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¹⁾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、内割混合、外割混合ともに同じ成分のものを使用している。フライアッシュを使

表-2 鋼材引張試験結果

	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_u (%)	ϵ_{st} (%)	破断伸び EL (%)	降伏ひずみ ϵ_y (%)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
□25	390	451	86.6	0.808	18.0	0.255	2.15×10 ⁵
□33	377	445	85.5	0.619	17.9	0.191	2.15×10 ⁵
○40	330	424	77.8	-	26.7	0.361	2.05×10 ⁵

ϵ_{st} : ひずみ硬化開始時ひずみ度

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 ³)					スランプ (cm)	フロー (cm)	空気量 (%)
			W	C	FA	S	G			
MO36	50.0	35.3	180	360	150	694	884	23.0	41.5	4.9
N52	41.0	41.0	175	427	0	769	979	20.5	44.5	4.1
MI52	48.2	41.0	175	363	64	760	968	17.0	29.6	5.2

用することを考慮して中流動コンクリートタイプを想定して、スランプフローの目標値を $450 \pm 50\text{mm}$ 、空気量の目標値を $4.5 \pm 1.0\%$ と設定した。MO36 と N52 はフレッシュ性状の目標値を満足したが、MI52 はスランプフロー値の目標値を満足しなかった。MFAS の材料確保の問題があり、今回は空気量の目標値を満足していたので、力学性状に与える影響は少ないと判断してそのまま打込んだ。

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-2 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。62 日強度で MI52 は、N52 の 0.83 倍、MO36 は N52 の 0.92 倍である。図-3 にコンクリート圧縮強度と材齢の関係を示す。MFAS 内割混合コンクリートの強度と普通コンクリートを比較すると、7 日強度以降は同様な強度上昇率である。普通コンクリー

表-4 コンクリート圧縮試験結果

材齢 (日)	試験体	σ_B (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
7	MO36	—	—
	N52	40.6	3.36×10^4
	MI52	32.6	2.85×10^4
28	MO36	—	—
	N52	49.8	3.53×10^4
	MI52	41.3	3.14×10^4
62	MO36	50.9	3.19×10^4
	N52	55.1	3.52×10^4
	MI52	45.5	3.30×10^4
91	MO36	53.2	3.21×10^4
	N52	55.4	3.66×10^4
	MI52	44.6	3.52×10^4

σ_B : コンクリート圧縮強度, E_c : ヤング係数

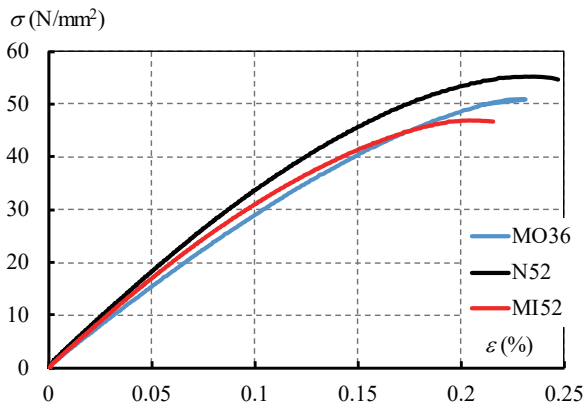


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係 (材齢 62 日)

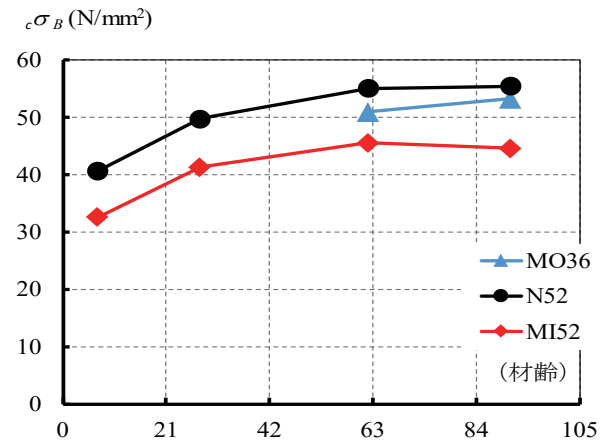


図-3 コンクリート圧縮強度-材齢関係

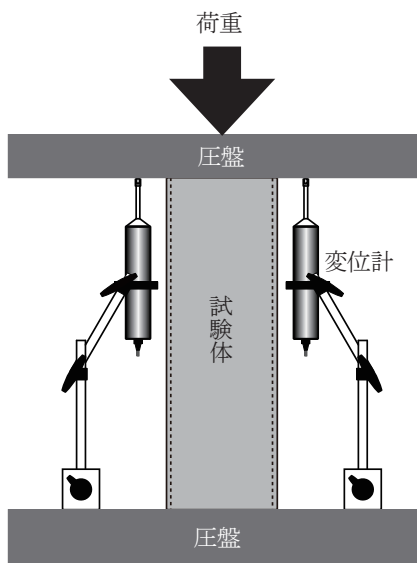


図-4 加力装置

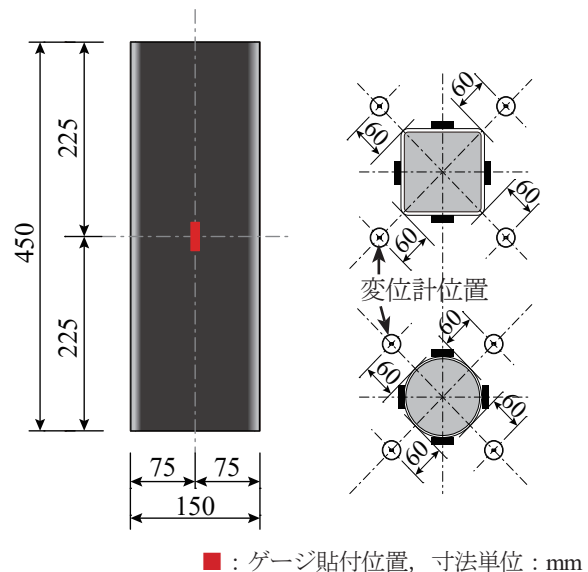


図-5 変位計およびひずみゲージ貼付位置

トおよび MFAS 内割混合コンクリートは 62 日以降の強度上昇は見られないが、MFAS 外割混合コンクリートは 62 日以降も強度上昇が見られた。

2.3 加力・測定方法

加力は図-4 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-4、5 に示すように、試験体断面の対角線上に 4 台の変位計を設置し計測を行った。また、図-5 に示すように角形鋼管試験体には各面に、円形鋼管試験体には円周を 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 軸力-軸ひずみ関係

図-6 に各試験体の軸力-軸ひずみ関係を示す。軸ひずみは、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。本実験においては、幅厚比が同じ場合、普通コンクリート CFT と MFAS 混合コンクリート CFT は、ほぼ同様の履歴を示しているが、幅厚比 25 の普通コンクリートを用いた試験体は、ひずみが 4% を超えたあたりから、再度荷重の上昇がみられた。角形鋼管においては、MFAS 内割混合コンクリートを用いた場合、外割混合コンクリートを用いた場合よりも最大荷重以降の耐力低下は少ない。これは、MFAS の混合方法の違いによる影響である可能性が考えられる。また、全ての試験体において、最大荷重直前に局部座屈が発生した。

写真-1 に MFAS 内割混合コンクリート CFT 柱の実験終了後の写真を示す。角形鋼管については、局部座屈の発生状況および鋼管の膨張の様子はほぼ同様であるが、円形鋼管については、外割混合コンクリートの場合は頭部、中部および脚部に局部座屈が発生しているが、内割混合コンクリートの場合は頭部および中部に局部座屈が発生しており、脚部に局部座屈の発生は見られなかった。

図-7 に解析による軸力-軸ひずみ関係を示す。図の縦軸は軸力を単純累加強度 N_0 ($N_0 = A_s \cdot \sigma_y + A_c \cdot \sigma_B$, A_s : 鋼管断面積, σ_y : 鋼管降伏強度, A_c : コンクリート断面積, σ_B : コンクリート圧縮強度) で除して、耐力比として表している。解析には崎野ら⁹⁾の応力-ひずみ関係モデルを用いており、円形 CFT 柱のコンクリートモデルについては、拘束効果と変形性能の改善効果を取り込んだものを、角形 CFT 柱の鋼管モデルについては、鋼管の幅厚比によって 3 通りに分けた局部座屈などを考慮したモデルを用いた。応力-ひずみ関係モデルについて詳しくは文献 6) を参照されたい。鋼材およびコンクリートの強度は試験体の材料特性の値を用いた。角形 CFT 短柱においては、普通コンクリートおよび MFAS 混合コンクリートともに最大耐力はほぼ一致しているが、幅厚比が小さい試験体にお

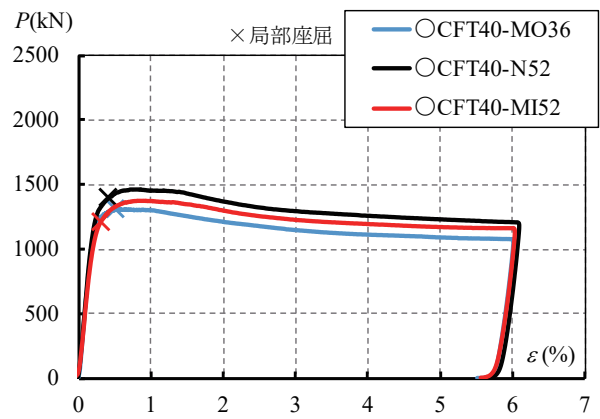
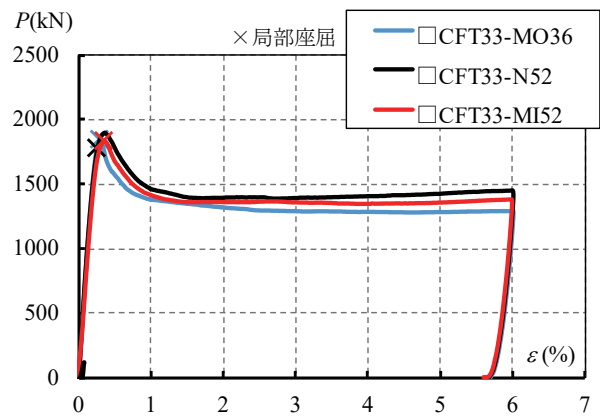
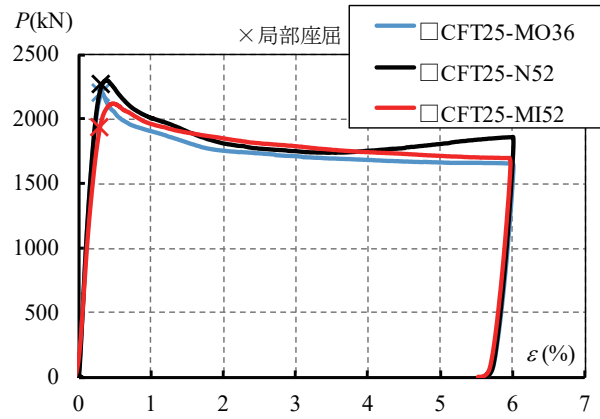


図-6 軸力-軸ひずみ関係



□ CFT33-MI52 □ CFT25-MI52 ○ CFT40-MI52

写真-1 実験終了後

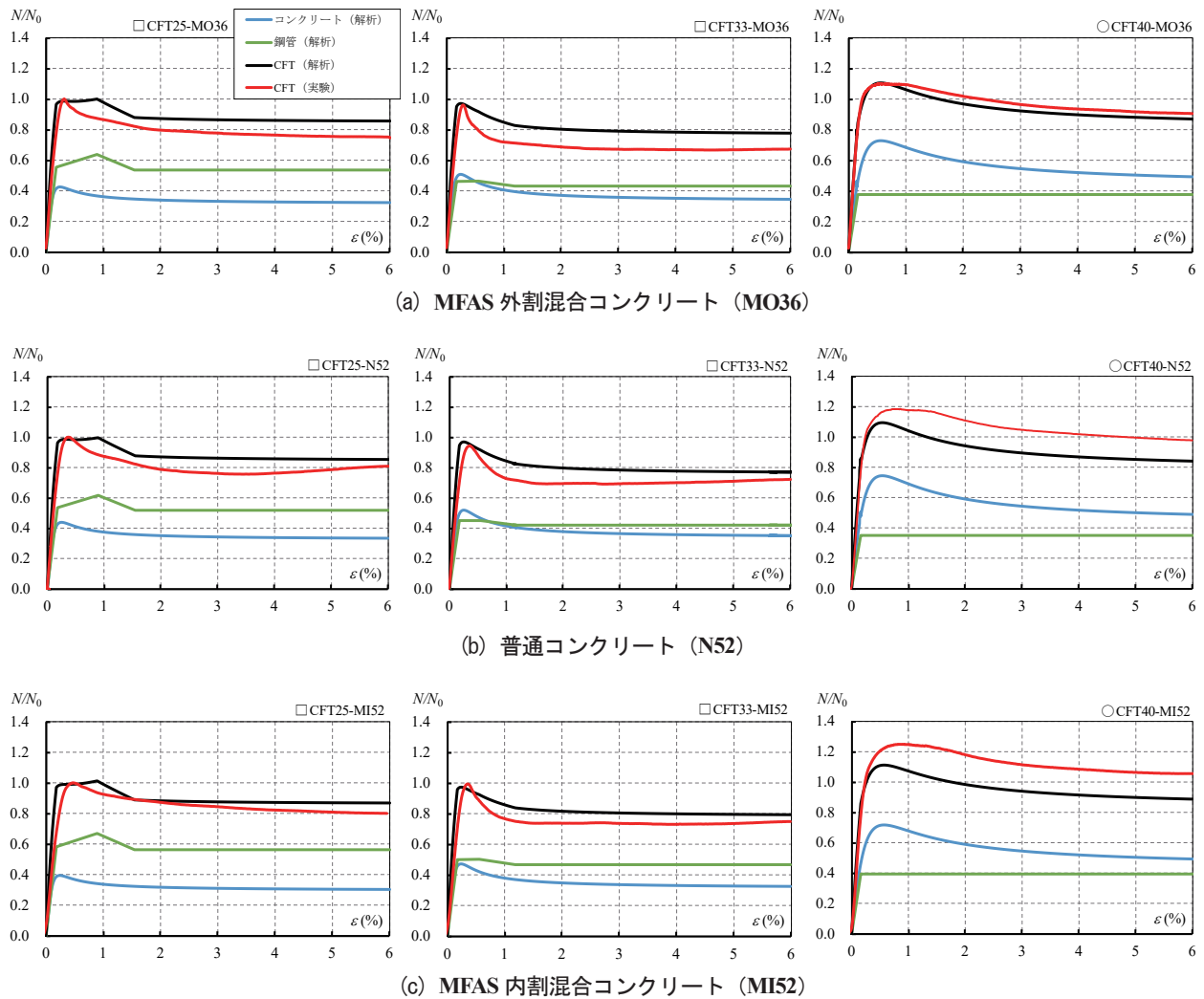


図-7 解析による軸力-軸ひずみ関係

いては、最大耐力時のひずみに隔たりが生じている。角形断面においては、MFASの有無および内割、外割に限らず耐力低下以降の解析値が危険側の評価となる。また、円形CFT短柱において、MFAS外割混合コンクリートでは実験値を精度よく評価できているが、普通コンクリートおよびMFAS内割混合コンクリートにおいては安全側の評価となっている。

3.2 最大荷重および初期剛性

実験結果一覧を表-5に示す。MFAS内割混合コンクリートCFTの最大荷重は、普通コンクリートCFTのおよそ0.94倍程度となった。また、円形鋼管の場合、MFAS外割混合コンクリートを用いた場合よりも、MFAS内割混合コンクリートを用いた方が、シリンダー強度が低いにも関わらず最大荷重が大きくなった。また、角形鋼管を用いたCFT柱の場合は、単純累加強度の値とほぼ同等な結果が得られたが、円形鋼管を用いたCFT柱の場合は単純累加強度より実験値が大きくなった。円形CFT柱でコンクリートの拘束効果を考慮した場合、MFAS外割混合コンクリートは計算値と同等な結果となったが、普通コンクリー

トおよびMFAS内割混合コンクリートの場合は実験値が大きくなった。

初期剛性は、CFTについて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算定している。全体的に概ね計算値と一致している。しかし、 \square CFT33-N52および \square CFT25-MI52においては、実験値の初期剛性が計算値よりも若干低くなる傾向が見られた。このことに関しては、キャッピングの際に、鋼管端面とモルタル面に若干の段差が確認されていることから、キャッピングの仕方等の影響が考えられる。

4. まとめ

- 1) CFT短柱において幅厚比が同じ場合、普通コンクリートCFTとMFAS混合コンクリートCFTは、ほぼ同様の履歴を示した。
- 2) 角形鋼管においては、MFAS内割混合コンクリートを用いた場合、外割混合コンクリートを用いた場合よりも最大荷重以降の耐力低下は少なかった。
- 3) CFT短柱全ての試験体において、最大荷重直前に局部

表-5 実験結果一覧

試験体	${}_{ex}P_{max}$ (kN)	$\frac{M}{N}$	N_0 (kN)	$\frac{{}_{ex}P_{max}}{N_0}$	δ_u (mm)	ϵ_u (%)	K_{ex} ($\times 10^3$ kN)	K_{cal} ($\times 10^3$ kN)	$\frac{K_{ex}}{K_{cal}}$
□ CFT25-MO36	2194	0.96	2198	1.00	1.44	0.32	1301	1259	1.03
□ CFT33-MO36	1843	0.97	1917	0.96	1.29	0.29	1135	1124	1.01
○ CFT40-MO36	1303	0.89	1185 (1311)	1.10 (0.99)	2.91	0.69	735	722	1.02
□ CFT25-N52	2295	-	2293	1.00	1.67	0.37	1303	1356	0.96
□ CFT33-N52	1902	-	2020	0.94	1.63	0.36	1097	1227	0.89
○ CFT40-N52	1464	-	1234 (1353)	1.19 (1.08)	3.53	0.86	734	780	0.94
□ CFT25-MI52	2116	0.92	2116	1.00	2.14	0.48	1056	1316	0.80
□ CFT33-MI52	1828	0.96	1833	1.00	1.59	0.35	1150	1188	0.97
○ CFT40-MI52	1375	0.94	1101 (1224)	1.25 (1.12)	3.77	0.91	717	749	0.96

${}_{ex}P_{max}$: 実験値最大荷重, M/N : MFAS 混合コンクリート実験値 / 普通コンクリート実験値
 N_0 : 単純累加強度, $N_0 = A_s \cdot \sigma_y + A_c \cdot \sigma_B$, () 内は文献 6) の (6) 式を用いた拘束効果を考慮した計算値
 δ_u : 最大荷重時縮み, ϵ_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), $K_{cal} = P / \epsilon = A_s \cdot E_s + A_c \cdot E_c$

座屈が発生した。

- 4)MFAS 内割混合コンクリート CFT の最大荷重は、普通コンクリート CFT のおよそ 0.94 倍であった。
- 5)角形鋼管を用いた CFT 柱の場合は、単純累加強度の値とほぼ同等な結果が得られたが、円形 CFT 柱の場合、拘束効果を考慮した計算値よりも、実験値が大きくなる傾向がみられた。
- 6)初期剛性に関しては、キャッピングに不具合があった試験体以外は、概ね計算値と一致している。
- 上記より、本実験における短柱圧縮試験については、MFAS 混合コンクリートを普通コンクリートと同様に設計することは可能であると考えられる。ただし、今後も基礎資料の蓄積、および外割混合によるコンクリート強度上昇率および内割混合によるコンクリート強度低下率を適切に評価することが必要である。

謝辞

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、九州産業大学姜研究室の学生および北九州市立大学 EA 三倉英史氏、板並佐織氏、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) 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.
- 4) 日本建築学会 : 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2001.1.
- 5) 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.
- 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.