

(37) 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 CFT柱の圧縮挙動に関する実験的研究

姜 優子¹・城戸將江²・陶山裕樹³・高巢幸二⁴

¹正会員 九州産業大学准教授 建築都市工学部建築学科
(〒813-8503 福岡県福岡市東区松香台2丁目3-1)

E-mail:kang@ip.kyusan-u.ac.jp

²正会員 北九州市立大学准教授 国際環境工学部建築デザイン学科
(〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:kido-m@kitakyu-u.ac.jp

³正会員 北九州市立大学准教授 国際環境工学部建築デザイン学科
(〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:suyama@kitakyu-u.ac.jp

⁴正会員 北九州市立大学教授 国際環境工学部建築デザイン学科
(〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:takasu@kitakyu-u.ac.jp

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、鋼管に充填するコンクリート強度を変動因子としCFT短柱圧縮試験を行い、圧縮挙動を確認した。その結果、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、本実験の変数の範囲内であれば、概ね普通コンクリートと同様に評価することが可能であると考えられるが、CFTにおけるMFAS混合コンクリートの解析方法については、今後も検討を行う必要がある。

Key Words : concrete filled steel tube, stub column test, fly ash, flotation method, concrete strength

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¹⁾。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改質したものを使用したコンクリートの力学性状が、JIS II種フライアッシュを使用したコンクリートと同様な傾向を示すことを確認している²⁾。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^{3,4)}。

コンクリート強度を変化させるためには、MFAS置換率が変わってくるため、そのことがCFT柱の挙動に影響を及ぼすのではないかと考えた。そこでMFAS混合コンクリートを用いたCFT短柱において、コンクリート強度を変動因子としたCFT短柱圧縮試験を行った。

2. 実験概要

(1) 試験体

表-1に試験体一覧ならびに鋼管実測値を示す。断面は角形および円形とし、CFT短柱4体の実験を行った。試験体の材長は断面せい、径の3倍とし、実験の変動因子はMFAS混合の有無である。既往の研究で、コンクリート圧縮強度50.9, 55.1N/mm²での実験を実施している^{2,3)}の

表-1 試験体一覧，使用コンクリートならびに鋼管実測値

試験体	コンクリート			鋼管						年度
	コンクリート 強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	MFAS 混合	材質	せい <i>D</i> (mm)	板厚 <i>t</i> (mm)	長さ <i>L</i> (mm)	外径 <i>R_o</i> (mm)	内径 <i>R_i</i> (mm)	
□CFT33-N55 ³⁾	55.1	62	無	STKR400	150.5	4.21	449.2	10.1	5.8	2017
○CFT40-N55 ³⁾				STK400	139.6	3.30	411.0	—	—	
□CFT33-N33	32.7			STKR400	150.5	4.22	451.0	9.9	5.9	2019
○CFT40-N33				STK400	139.6	3.4	419.8	—	—	
□CFT33-MO51 ²⁾	50.9	62	有	STKR400	150.0	4.12	448.4	10.1	6.0	2016
○CFT40-MO51 ²⁾				STK400	139.6	3.40	419.0	—	—	
□CFT33-MO42	41.5			STKR400	150.7	4.22	450.7	9.9	5.7	2019
○CFT40-MO42				STK400	139.6	3.43	421.9	—	—	

で，それらよりも低いコンクリート強度になるように調合を行い，既往の研究と比較を行うことでコンクリート圧縮強度の違いによる影響について検討する．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（径厚比），dはコンクリートの種類（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62日強度を示している．表-1の外径は鋼管コーナー部の外側曲率半径を，内径は鋼管コーナー部の内側曲率半径を示している．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．図-1に試験体形状を示す．CFT短柱圧縮試験は材齢62日に行った．

(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．鋼材引張試験は文献2)と同じ鋼管のため，その結果を表-2に示す．降伏応力が不明な場合は，オフセット法により，実験値と0.2%オフセットした直線との交点を，降伏応力度および降伏ひずみとしている．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．

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）30N/mm²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³⁾により強熱減量2%以下に改質し，改質灰をスラリー

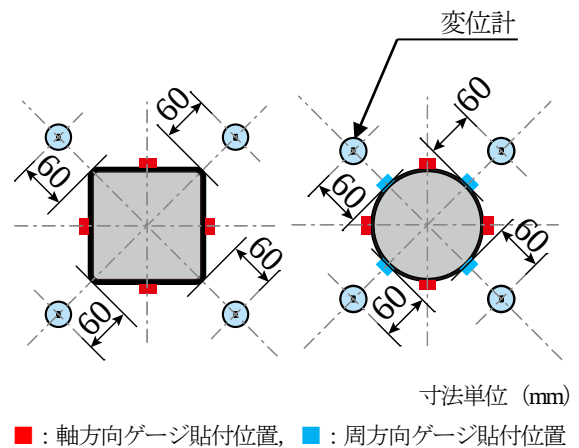
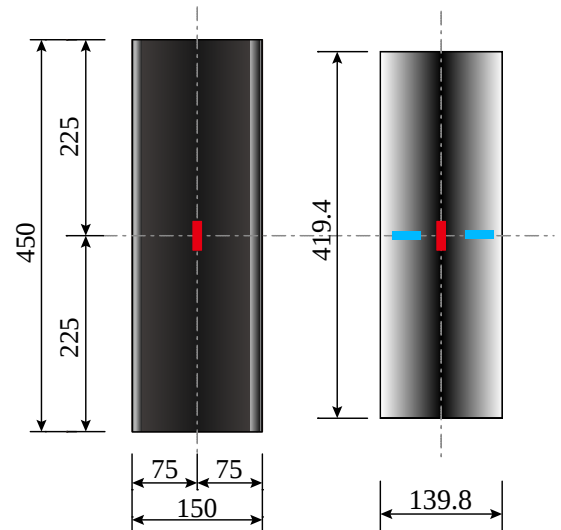


図-1 試験体形状，変位計およびひずみゲージ貼付位置

表-2 鋼材引張試験結果²⁾

	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 (%)	降伏ひずみ ε_y (%)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
□33	377	445	85.5	17.9	0.191	2.15×10^5
○40	330	424	77.8	26.7	0.361	2.05×10^5

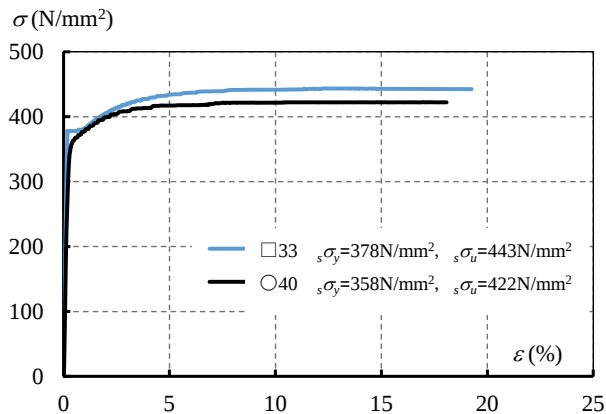
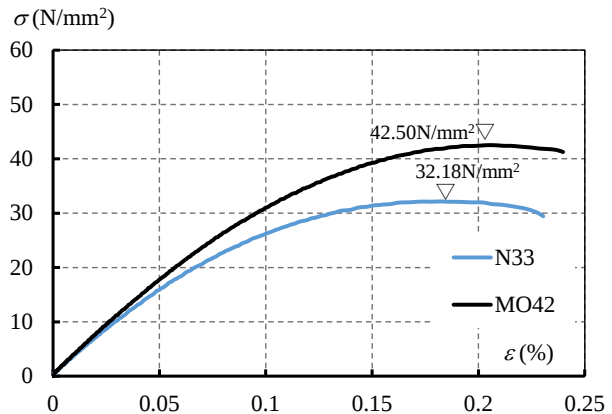
図-2 鋼材の応力-ひずみ関係²⁾

図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

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/m³)					スランプ (cm)	フロー (cm)	空気量 (%)
			W	C	FA	S	G			
N55 ³⁾	41.0	41.0	175	427	0	769	979	20.5	44.5	4.1
N33	64.4	64.4	177	275	0	884	945	19.0	29.8	3.4
MO51 ²⁾	50.0	35.3	180	360	150	694	884	23.0	41.5	4.9
MO42	76.6	46.0	177	231	154	855	810	—	68.5	3.5

状態で混和材としている。フライアッシュの混合割合は、MO51においては29%、MO42においては40%となっている。フライアッシュを使用することを考慮し、中流動コンクリートタイプになることを想定して、2017年度まではスランプフローの目標値を 45.0 ± 5.0 cm、空気量の目標値を 4.5 ± 1.0 %と設定した。本実験に関しては、空気量の目標値を 3.0 ± 1.0 %としている。

代表的なコンクリートの応力-ひずみ関係を図-3に、コンクリートの圧縮試験結果を表-4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、1/3

圧縮強度時割線剛性とした。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。62日強度について、N33では予定強度とほぼ同等の値となったが、MO42の強度は設計基準強度の1.39倍と、予定よりも大きな値となった。しかし、通常強度管理材齢は28日強度であり、28日強度に着目すると、N33およびMO42ともに、CFT施工時によく使われる $30 \sim 36$ N/mm²あたりの数値を示している。ヤング係数に関しては、MO42はMO51より圧縮強度が低い、ヤング係数が高い値となっている。これは試験体作製年度によっての使用材料の

表-4 コンクリート圧縮試験結果

材齢 (日)	種別	コンクリート 圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	圧縮強度時 のひずみ ϵ_u (%)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)
7	N55 ³⁾	40.6	0.21	3.36×10^4
	N33	22.0	0.18	2.73×10^4
	MO51 ²⁾	—	—	—
	MO42	22.7	0.20	2.60×10^4
28	N55 ³⁾	49.8	0.22	3.53×10^4
	N33	28.6	0.19	2.83×10^4
	MO51 ²⁾	—	—	—
	MO42	35.8	0.21	3.17×10^4
62	N55 ³⁾	55.1	0.23	3.52×10^4
	N33	32.7	0.20	3.19×10^4
	MO51 ²⁾	50.9	0.22	3.06×10^4
	MO42	41.5	0.21	3.47×10^4
91	N55 ³⁾	55.4	0.22	3.66×10^4
	N33	32.2	0.20	3.19×10^4
	MO51 ²⁾	53.2	0.23	3.21×10^4
	MO42	43.2	0.21	3.51×10^4

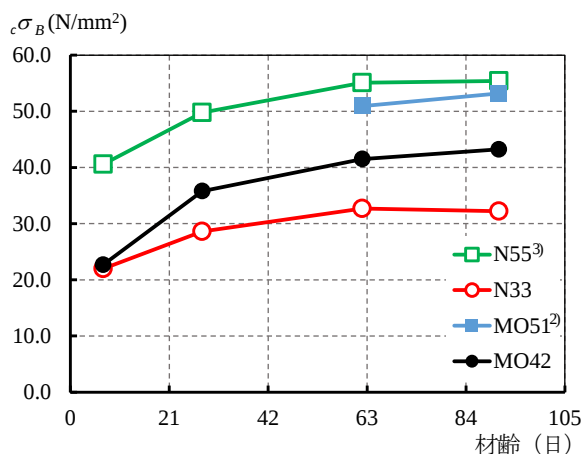


図-4 コンクリート圧縮強度－材齢関係

違いが影響していると考えられる。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量で圧縮強度を確保でき、CO₂排出量の削減に寄与することが確認できた。図-4にコンクリート圧縮強度と材齢

の関係を示す。普通コンクリートは62日以降の強度の伸びはみられないが、MFAS混合コンクリートは62日以降も強度が伸びていることが確認できた。

(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載荷させる静的単調載荷により行った。軸方向変位は図-1、5に示すように、試験体断面の対角線上に4台の変位計を設置し計測を行った。また、図-1に示すように角形試験体は各面に、円形試験体は円周を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。

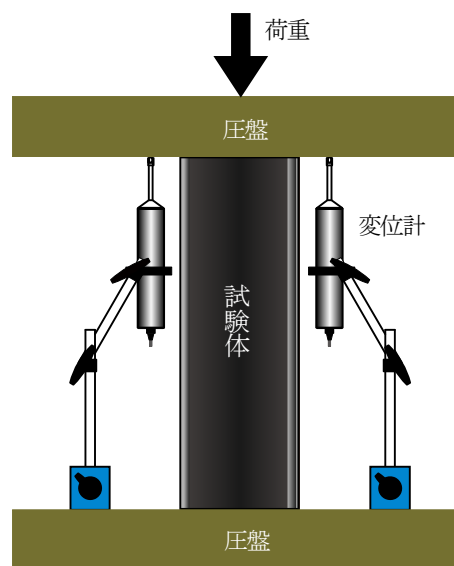


図-5 加力装置

3. 実験結果

(1) 実験結果と耐力評価

実験結果一覧を表-5に示す。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によるひずみの値の全平均が、300μ～600μ間の値を用いて平均剛性を求めたものであり、全体的に概ね計算値と一致していた。角形CFT短柱において、充填内容にかかわらず最大耐力は、単純累加強度の値とほぼ同じ値になることがわかった。円形CFT短柱においての最大耐力は、単純累加強度の値の110～123%の値になっており、円形鋼管の拘束効果を考慮した場合でも、99～112%と値に少しばらつきがみられた。また、○CFT40-N33および○CFT40-MO42においては、それぞれ○CFT40-N55、○CFT40-MO51と比較すると最大荷重時のひずみが大きくなる傾向がみられた。

表-5 実験結果一覧

試験体	eP_{max} (kN)	N_0 (kN)	$\frac{eP_{max}}{N_0}$	δ_u (mm)	$s\epsilon_u$ (%)	K_{ex} ($\times 10^3$ kN)	K_{cal} ($\times 10^3$ kN)	$\frac{K_{ex}}{K_{cal}}$
□CFT33-N55 ³⁾	1902	2059	0.92	1.63	0.36	1097	1227	0.89
□CFT33-N33	1517	1571	0.97	1.85	0.41	1007	1163	0.87
□CFT33-MO51 ²⁾	1843	1907	0.97	1.29	0.29	1134	1137	1.00
□CFT33-MO42	1742	1751	0.99	1.46	0.32	1167	1221	0.96
○CFT40-N55 ³⁾	1464	1234 (1334)	1.19 (1.08)	3.53	0.86	734	780	0.94
○CFT40-N33	1150	933 (1047)	1.23 (1.10)	8.57	2.04	646	741	0.87
○CFT40-MO51 ²⁾	1303	1185 (1290)	1.10 (0.99)	2.91	0.69	735	722	1.02
○CFT40-MO42	1306	1058 (1169)	1.23 (1.12)	6.11	1.45	698	781	0.89

eP_{max} : 実験値最大荷重, N_0 : 単純累加強度 ($N_0 = sA \cdot s\sigma_y + cA \cdot c\sigma_B$, sA : 鋼管の断面積, $s\sigma_y$: 鋼管の降伏強さ, cA : コンクリートの断面積, $c\sigma_B$: コンクリートのシリンダー強度), () 内はCFT指針³⁾第一編による円形CFT短柱の終局耐力を用いた拘束効果および寸法効果を考慮した計算値, δ_u : 最大荷重時縮み, $s\epsilon_u$: 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, $K_{cal} = P/\epsilon = sA \cdot E_s + cA \cdot E_c$)

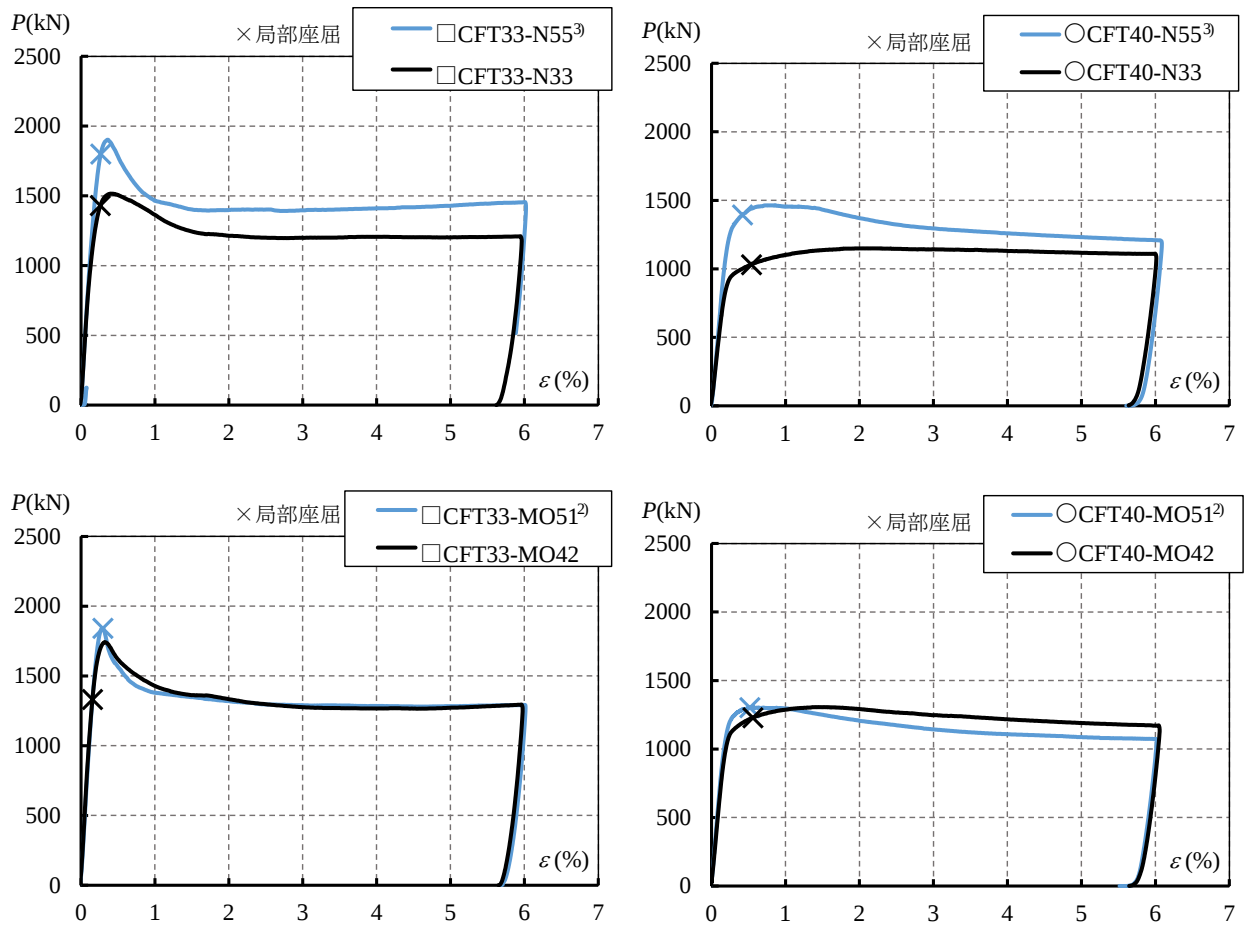


図-6 軸力-軸ひずみ関係

図-6に各試験体の軸力 P —軸ひずみ ε 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-6によれば、角形CFTで普通コンクリートの場合、コンクリート強度が小さい方が最大耐力以降の荷重の低下が緩やかになっている。また、MFAS混合コンクリートCFTの場合、コンクリート強度が 42N/mm^2 および 51N/mm^2 という 10N/mm^2 程度の違いであれば、ほぼ同様の履歴を示す結果となった。CFT試験体全てにおいて、最大荷重以前に鋼管は降伏し、局部座屈が発生していた。

図-7に周方向ひずみ ε_θ と軸方向ひずみ ε の関係を示す。円形CFT短柱における拘束効果の影響は、普通コンクリートとMFAS混合コンクリートでは、最大耐力まではほぼ同様の履歴であり、同様の拘束効果を得られていると考えられる。

実験終了後の状態を写真-1に示す。普通コンクリートおよびMFAS混合コンクリートともに、円形CFTの場合、上部、中部、脚部と局部座屈が発生しており、角形CFTにおいては中部に集中的に局部座屈が発生していたが、コンクリート強度の影響は特にみられなかった。

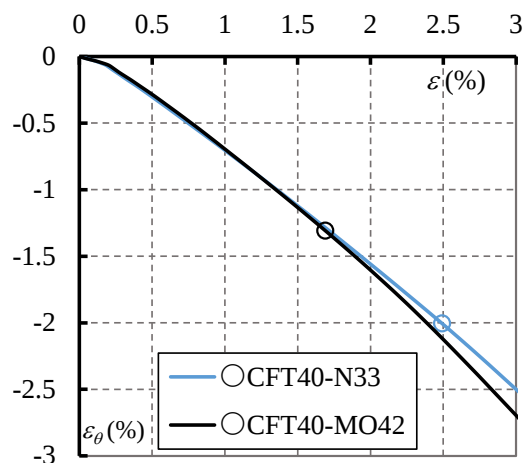
(2) 軸力—軸ひずみ関係の検討

ここで、変形性能について、文献⁹⁾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⁷⁾である。解析に用いた値の詳細は文献⁹⁾を参考にされた。

図-8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。CFT試験体の縦軸は、軸力を単純累加強度 $N_0 (=A \times \sigma_y + A \times \sigma_B)$ で除して耐力比として表している。MFAS混合コンクリートを用いた試験体に着目すると、角形CFT短柱においては、最大耐力はほぼ一致しているが、耐力低下以降の解析値が実験値より大きくなり、危険側の評価となった。円形CFT短柱においては、○CFT40-MO51については精度よく評価できているが、○CFT40-MO42は実験値の最大耐力が解析値の110%程度となり、実験値の最大耐力時のひずみは解析値の2倍程度となっている。

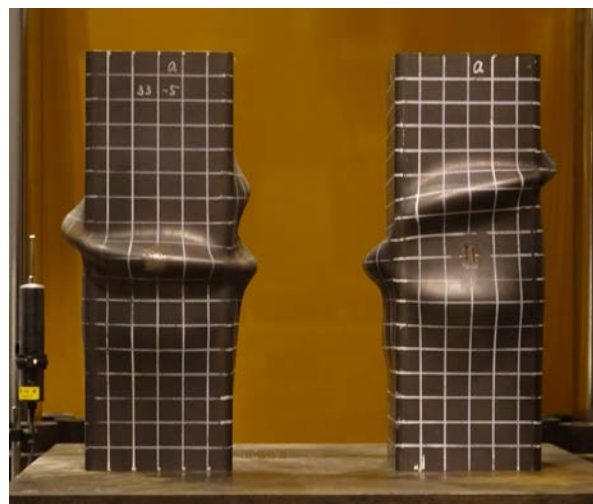
4. まとめ

- 1) 本実験においては、MFAS混合コンクリートCFT短柱の充填コンクリート強度が 42N/mm^2 および 51N/mm^2 という 10N/mm^2 程度の違いであれば、ほぼ同様の履歴を示す結果となった。



○ : 最大耐力時

図-7 周方向ひずみ ε_θ —軸方向ひずみ ε 関係



左 : □CFT33-MO51²⁾

右 : □CFT33-MO42



左 : ○CFT40-MO51²⁾

右 : ○CFT40-MO42

写真-1 実験終了後試験体

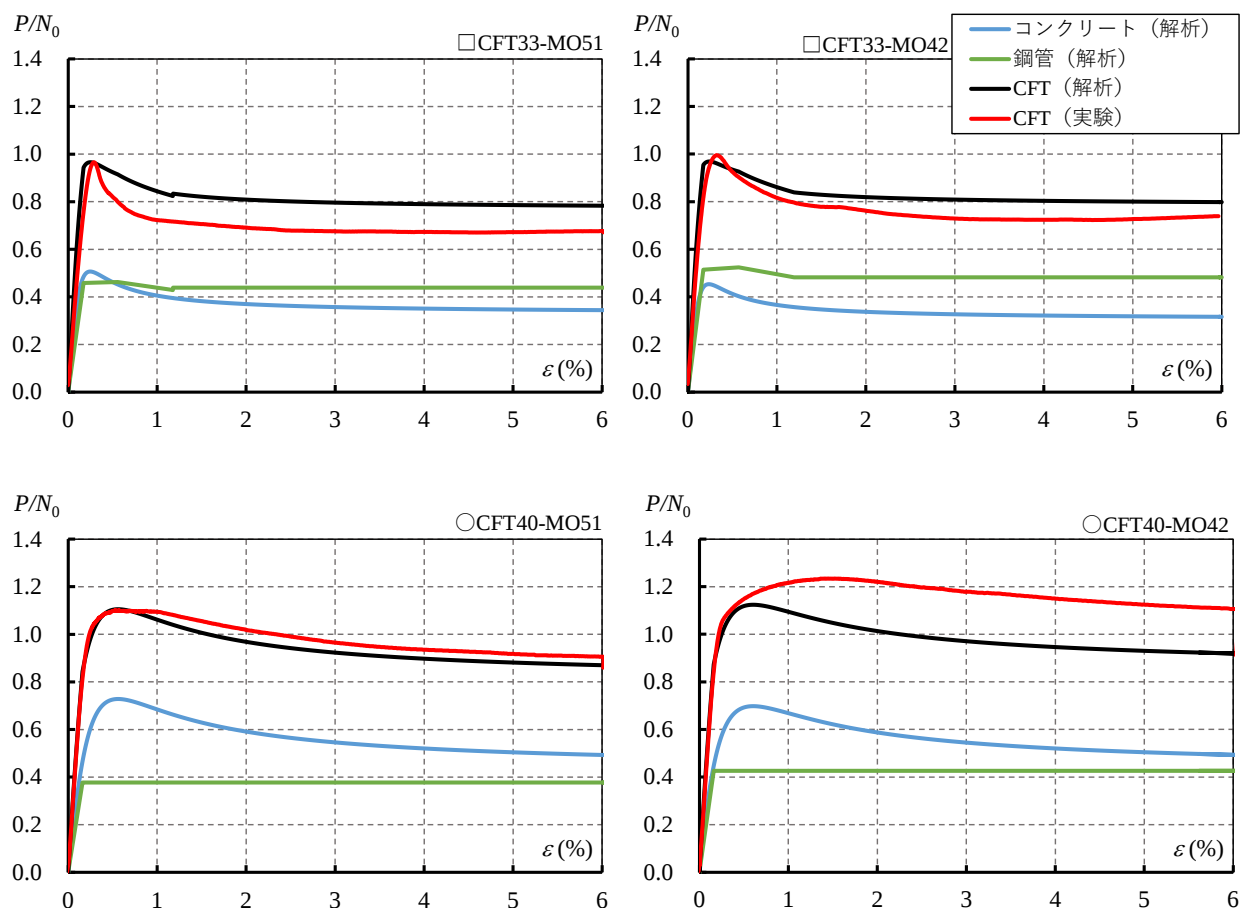


図-8 解析による軸力-軸ひずみ関係

- 2) 角形CFT短柱において、充填コンクリートの種類にかかわらず最大耐力は、単純累加強度の値とほぼ同じ値になることがわかった。
- 3) 円形CFT短柱の最大耐力は、単純累加強度の値の110～123%の値になっており、円形鋼管の拘束効果を考慮した場合でも、99～112%と値に少しばらつきがみられた。
- 4) ○CFT40-N33および○CFT40-MO42においては、それぞれ○CFT40-N55、○CFT40-MO51と比較すると、最大荷重時のひずみが大きくなる傾向がみられた。
- 5) 変形性能については、崎野らの解析方法⁹⁾で概ね評価することが可能と考えられるが、○CFT40-MO42については大きく挙動が違っており、原因が明確でないため、解析方法については、今後も検討を行う必要がある。

謝辞：本研究は令和元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。実験の遂行に当たり、九州産業大学2019年度卒業生安部壮一郎君、岩村拓郎君、小島健矢君、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) 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，Vol.41，No.2，pp.1129-1034，2019.7。

- 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.
- 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.
- (Received September 10, 2021)

EXPERIMENTAL STUDY ON COMPRESSIVE CHARACTERISTICS
OF CONCRETE FILLED STEEL TUBE SHORT COLUMNS
CONSIDERING THE STRENGTH OF ECOLOGICAL CONCRETE
WITH MODIFIED FLY ASH SLURRY

WooJa KANG, Masae KIDO, Hiroki SUYAMA and Koji TAKASU

In previous studies, it was confirmed case that there have great potential for the use to concrete filled steel tube (CFT) of ecological concrete with modified fly ash slurry (MFAS) from which unburned carbon has been removed by the flotation method. Therefore, a stub column test was conducted using the strength of concrete of CFT as a variable factor, and the compression behavior was confirmed. As a result, stub column test, it is considered that the ultimate strength and deformation performance of CFT short columns using concrete with MFAS can be evaluated in the same way as commonly used CFT short columns. It is necessary to continue to study the analysis of CFT columns using concrete with MFAS.