

論文 分級した木質バイオマス燃焼灰を用いたセメントレス材料の物性

澤田 周一郎^{*1}・弘瀬 密樹^{*2}・近藤 拓也^{*3}・横井 克則^{*3}

要旨：木質バイオマス発電所から排出される燃焼灰，火力発電所から排出されるフライアッシュ，そして消石灰を用いたセメントレス材料の基礎的物性の検討を行うため，空気量試験，スランプ試験，フロー試験，圧縮強度試験および収縮試験を実施した。試験配合は水結合材比 70%，消石灰置換率 26%一定とし，フライアッシュ置換率を 3 水準とした。また木質バイオマス燃焼灰は乾燥させたもの，そしてさらに 0.15mm のふるいを通した分級灰の 2 種類により検討を行った。その結果，燃焼灰を分級することによって強度が増加する傾向が得られた。また，養生方法の違いにより供試体の圧縮強度や収縮性状が変化した。

キーワード：セメントレス材料，木質バイオマス燃焼灰，分級，消石灰，フライアッシュ

1. はじめに

近年，世界的に地球温暖化が問題視されており，温室効果ガスを削減する取り組みが行われている。その一環として再生可能エネルギーの活用が進められており，中でも森林資源を有効活用できる木質バイオマス発電に注目が集まっている。木質バイオマス発電とは，未利用間伐材や廃材などを原料としたチップやペレットを燃焼し，蒸気でタービンを回転させることによって発電する方法である。その燃焼プロセス中には，木質バイオマス燃焼灰（以下，燃焼灰）が発生しており，その量は 2023 年で最大 81 万トンと推定されている¹⁾。また，年々発電所が増加していることから，将来的には 200 万トンにまで上るとされている。しかし，産業廃棄物である燃焼灰の処分はコストが高く，発電所の採算性を悪化させている。そのため，燃焼灰の有効活用手段を早急に確立する必要がある。現在検討されている有効活用法として，土壌改良資材や肥料原料²⁾，建設資材などがある³⁾。

燃焼灰を建設資材へ適用する事例として，セメントの原料として利用する事例はあるが，セメントの代替品としての事例は少ない。しかし，燃焼灰成分の特徴としてカルシウムが多く含まれているという点があり⁴⁾，セメントとの類似点がある。そのため，燃焼灰をセメントの代替品として利用できる可能性がある。既往の研究により⁵⁾，未加湿の燃焼灰と水のみで練り混ぜた木灰コンクリートの圧縮強度が材齢 7 日目において 3.1N/mm²であった。この結果は，建設資材として利用するには実用面から不足しており，さらなる検討を要する。

そのため本研究では，燃焼灰を用いたセメントレス材料の初期強度増進を目的として，炉乾燥した燃焼灰（以下，乾燥灰）を分級したもの（ふるい目 0.15mm）を使用する。次に，分級による基礎性状の変化を調査するため，

乾燥灰との比較を行う。試験配合は，火力発電所における副産物であるフライアッシュと自然由来の消石灰との混合割合を試験要因とし，基礎的物性の検討を行う。

2. 実験内容

2.1 使用材料の概要

本研究で使用した燃焼灰は，高知県の木質バイオマス発電所から排出されたものとした。燃焼種には樹皮や端材を含む未利用木材のみを使用しており，木質チップに加工した後に木質バイオマス発電を行っている。

燃焼灰は燃焼過程により 3 種類に分類される。燃焼室やボイラー缶体の底部から排出される「主灰」，燃焼中にボイラー内に舞い上がった灰である「飛灰」，炉の隙間から落下した「リドリング灰」である。既往の研究より⁶⁾，飛灰と消石灰が水と最も反応し，強度発現に寄与している傾向が得られているため，本研究では飛灰を使用した。飛灰の特徴として，吸水率が高いという点があり，全体の約 3 割が水分である⁴⁾。そのため，そのまま使用すると水結合材比やフレッシュ性状に影響を与える可能性がある。そこで，本研究では飛灰を 110℃で 24 時間炉乾燥したものを使用した。また，初期強度増進を目的として，乾燥灰を 0.15mm のふるいでふるい，通過したもの（以下，分級灰）を使用した。

既往の研究により⁷⁾，燃焼灰は重金属含有量が高く，建設資材に用いるにあたって重金属の溶出が懸念点となる。そのため，燃焼灰に含まれる金属物質を事前に調査した結果，重金属の溶出による環境面への悪影響は小さかったため，問題ないとした。

燃焼灰の蛍光 X 線分析結果と X 線回折結果を表-1 および図-1，フライアッシュ（JIS A 6201 のⅡ種相当）の成分表を表-2 に示す。今回使用する燃焼灰成分の特徴

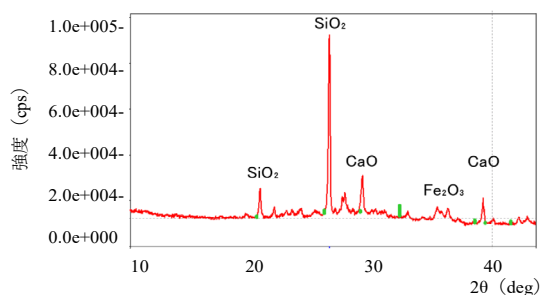
*1 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 (学生会員)

*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学専攻 (学生会員)

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

表－1 燃焼灰の蛍光 X 線分析結果

MgO	2.298	MnO	0.468
Al ₂ O ₃	11.803	Fe ₂ O ₃	12.002
SiO ₂	35.319	NiO	0.017
P ₂ O ₅	1.488	CuO	0.04
SO ₃	2.848	ZnO	0.11
Cl	1.068	Br	0.007
K ₂ O	9.184	Rb	—
CaO	20.873	SrO	0.119
TiO ₂	0.855	BaO	0.264
Cr ₂ O ₃	0.259	(単位：mass%)	



図－1 X 線回折結果

表－2 フライアッシュの成分表

品質		試験値	
SiO ₂		%	63.3
湿分		%	0.11
強熱減量		%	1.9
粉末度		cm ² /g	3050
フロー値比		%	102
活性度指数	材齡 28 日	%	80
	材齡 91 日	%	93

表－3 使用材料の密度

種類	材料名	略号	密度 (g/cm ³)
粉体	乾燥灰	M ₀	1.96
	分級灰	M ₁	2.56
	消石灰	S	2.21
	フライアッシュ (JIS II種)	FA	2.20
流体	水	W	1.00

として、ケイ素とカルシウムが多く含まれている。しかし、普通セメントと比較すると割合が少ない。また、既往の研究により⁸⁾、燃焼灰に含まれる SiO₂ はピーク強度

表－4 試験パラメータ

試験要因	水準
燃焼灰	乾燥灰, 分級灰
フライアッシュ置換率	10, 30, 50, 70%
養生方法	気中養生 (20℃室内) 水中養生 (20℃室内)

表－5 配合表 (乾燥灰)

フライアッシュ置換率	単位量 (kg/m ³)			
	水	燃焼灰	消石灰	フライアッシュ
10%(F10)	589	538.2	218.6	84.1
30%(F30)	594	373.5	220.7	254.6
50%(F50)	600	205.6	222.8	428.4
70%(F70)	605	34.6	224.9	605.4

表－6 配合表 (分級灰)

フライアッシュ置換率	単位量 (kg/m ³)			
	水	燃焼灰	消石灰	フライアッシュ
10%(F10)	629	575.2	233.7	89.9
30%(F30)	622	390.9	231.0	266.5
50%(F50)	615	210.8	228.4	439.2
70%(F70)	608	34.7	225.8	607.9

が高いとされており、結晶質である可能性がある。そのため、ポゾラン反応はあまり期待できないと考えられ、強度発現の面で懸念点となる。また、コンクリートの強度発現である水和反応に起因しないカリウムが多く含まれているため、カルシウムの割合を増加させるためにも除去する必要がある。しかし、本研究は基礎的物性の検討のため、カリウム成分の除去等の作業は行わなかった。

本研究の使用材料の密度を表－3 に示す。乾燥灰と分級灰は同時期に排出されたものを使用しているが、分級を行うことにより密度が増加した。また表－1 に示すように、普通セメントと比較してカルシウムとケイ素の割合が少ない。そのため、カルシウム成分の補填として消石灰（工業用特号）（Ca(OH)₂）を使用した。また、燃焼灰は粒子形状が粗く、練り混ぜ直後の流動性が低下することが明らかとなっている⁸⁾。そのため、ケイ素成分の補填および流動性改善を目的としてフライアッシュ II 種を使用した。なお、本研究で使した燃焼灰の吸水率は約 38%である。

表－7 試験方法

試験名	試験方法
空気量試験	JIS A 1128
スランブ試験	JIS A 1171
フロー試験	JIS R 5201
長さ変化試験	JIS A 1129
圧縮強度試験	JIS A 1108

写真－1 練り混ぜ直後のペースト表面
(乾燥灰, F70)

表－8 空気量とスランブ

種類	乾燥灰		分級灰	
	air (%)	slump (cm)	air (%)	slump (cm)
F10	10 以上	3.1	2.8	3.5
F30	6.6	9.3	1.5	9.1
F50	3.8	12 以上	1.2	12 以上
F70	2.0	12 以上	0.8	12 以上

2.2 試験配合

本研究のパラメータを表－4 に示す。また配合表を表－5 および表－6 に示す。水結合材比は 70%であり、結合材は燃焼灰＋消石灰＋フライアッシュとした。水結合材比は予備試験により、十分な流動性を得ることができる最低限の値とした。また、基礎的検討であるため混和剤等は使用しなかった。消石灰はカルシウムを含むため、燃焼灰とフライアッシュの反応を正しく評価はできない。しかし、予備試験により燃焼灰＋水では十分に反応せず、強度が発現しなかった。そのため、初期強度の獲得を目的として消石灰を使用した。また、同様の予備試験により消石灰置換率 26%において材齢 28 日強度が最も発現したため、本試験では消石灰置換率を 26%固定で行った。

2.3 供試体作製および養生条件

圧縮強度試験で用いる供試体の練り混ぜは、15L のバケツとハンドミキサーを用いて行った。順序としては、予めバケツに投入した 5L 分の燃焼灰、消石灰およびフライアッシュをハンドミキサーで 1 分程度かき混ぜた後、水を投入し、だまがなくなるまで練り混ぜを行った。練り混ぜ後はφ50×100mm の円柱型枠に打込みを行った。

長さ変化試験で用いる供試体の練り混ぜは、モルタルミキサーを用いて行った。練り混ぜ後は 40×40×160mm の角柱型枠に打設した。また、いずれの供試体も 3 日後に脱型を行った。材齢 3 日後に脱型を行った理由は、予備試験により普通セメントと比較すると凝結時間が遅い傾向が得られたためである。また、養生中における水分条件が供試体の基礎性状に与える影響を調査するため、養生方法は 20℃環境下中の気中と水中、2 水準とした。

2.4 試験項目

(1) 空気量試験およびスランブ試験

本研究における試験方法を表－7 に示す。予備試験において乾燥灰を混入したペーストには写真－1 のようなだまが確認され、空気量に変化が生じる可能性があった。そのため、JIS A 1128 に準じて空気量を測定した。スランブ試験は JIS A 1171 に準拠して空気量試験と同様に練り混ぜ直後に測定した。また、本研究では目標空気量およびスランブ値は定めないものとした。

(2) フロー試験

ペーストの流動性評価は、水結合材比が高いためスランブ試験とともに JIS R 5201「セメントの物理試験方法」のスランブフロー試験より、モルタルフロー試験機を用いてフローテーブルの打数を 15 回とし、直交する二軸方向の直径を測定し、フロー値とした。

(3) 圧縮強度試験

試験実施材齢は 7, 14, 28, および 91 日とした。また、供試体表面を平滑にするため、試験実施日の前日に研磨を行った。1 要因につき供試体を 3 本とし、その平均値を圧縮強度値とした。

(4) 長さ変化試験

長さ変化試験は JIS A 1129 に準じて行った。作製した 40×40×160mm の角柱供試体の打込み面を除く 2 側面に、標点間距離が 100mm となるようにコンタクトチップを貼り付けた。その後、コンタクト式ミクロン・ストレーンゲージで初期値を測定し、材齢 7 日ごとに同様の方法で測定を行った。1 要因にあたり供試体 3 本ずつ測定し、その平均値を使用した。なお、水中養生については、測定直前に養生槽から供試体を引き上げ、直後に測定を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 空気量およびスランブ

空気量とスランブ値を表－8 に示す。燃焼灰の混合割合の増加に伴い、空気量が増加しスランブが低下する傾向が得られた。これは、燃焼灰の吸水率が高いため、燃焼灰の使用量増加に伴い、吸収された水分量が増加したことが考えられる。

分級灰を用いたペーストの空気量は、乾燥灰のものよ

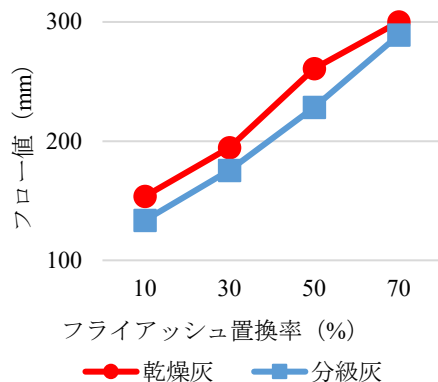


図-2 フロー値の比較

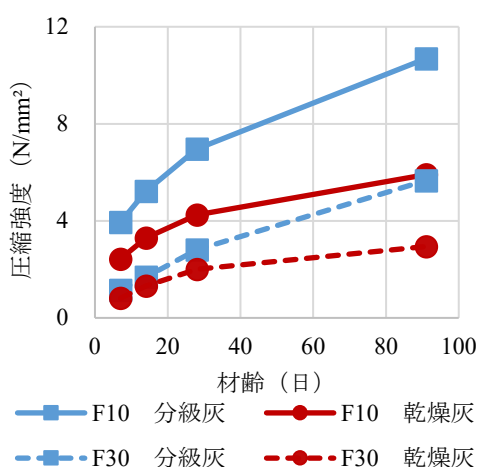


図-3 圧縮強度の経時変化（水中養生）

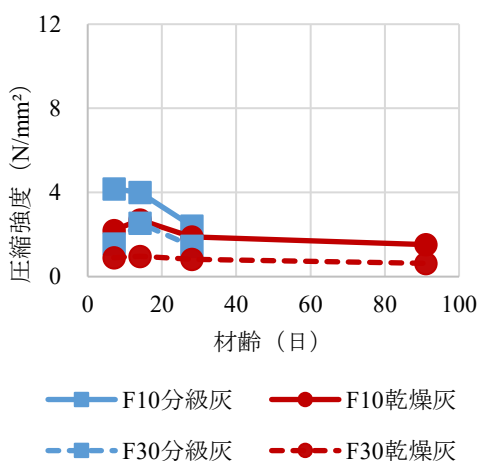


図-4 圧縮強度の経時変化（気中養生）

りも全体的に低い傾向を示した。これは、燃焼灰を分級することで 0.15mm より大きい粗大粒子がなくなり、供試体内部が緻密になったことが考えられる。また、写真-1 のように乾燥灰には灰のだまが確認できる。このだまには空気が含まれるため、エントラップトエアの他にだま中の空気も測定値に多く含まれていたと考えられる。

そのため、分級を行うことによってだまの発生が抑制されたため空気量が低下したものと考えられる。

3.2 スランプフロー値

乾燥灰および分級灰のフロー値の比較を図-2 に示す。フロー値はフライアッシュ置換率が増加するほど、大きくなる傾向を示した。これは、燃焼灰の性質である吸水率が高いことが影響しており、表-8 で示したスランプ値と整合性があると考えられる。また、フライアッシュは滑らかな球形粒子から成り立っているため、ワーカビリティの改善に寄与したと考えられる。

乾燥灰と分級灰のフロー値を比較すると、分級灰を用いた供試体では、いずれの配合においてもフロー値が低下する傾向を示した。これは、乾燥灰を分級したことにより比表面積が増加し、粘性が増加したためと考えられる。全体的な傾向として、フロー試験終了に一定時間が経過すると、供試体の端部からブリーディング水が発生した。これはフライアッシュ置換率の増加に伴い顕著だった。これは、水結合材比が大きいことに加え、フライアッシュ置換率の増加による吸水率が高い燃焼灰の使用量が減少したことが影響していると考えられる。

3.3 圧縮強度の経時変化

圧縮強度試験の結果について、水中養生を行ったものを図-3、そして気中養生を行ったものを図-4 に示す。なお、分級灰を用いた供試体におけるフライアッシュ置換率 50%および 70%では、水中、気中養生ともに材齢 3 日以降も脱型が行えなかったため、圧縮強度試験は実施しなかった。そのため、比較対象である乾燥灰のフライアッシュ置換率 50%および 70%のデータについても省略した。また、気中養生環境下における分級灰を用いた供試体は、材齢 91 日までに崩壊した。そのため、91 日の結果は掲載していない。

全体的な傾向として、F10 の圧縮強度が最も発現し、フライアッシュ置換率の増加に伴い、圧縮強度が低下する傾向を示した。これは、カルシウムを多く含んでいる燃焼灰の使用量が増加することで、フライアッシュ中のケイ素と反応し、C-S-H ゲルの生成が促進されたと考えられる。

水中養生では、いずれの配合も日数の経過に伴い圧縮強度が増加した。ボゾラン反応には水が必要なため、供試体を継続的に水中環境下に置くことで、反応が促進されたことが示唆された。また、既往の研究により、ボゾラン反応は 91 日以降に活性化するとされており、長期的に養生することで強度がさらに増加する可能性がある。そのため、今後は長期的な調査を行う必要がある。

気中養生下における材齢 7 日の圧縮強度は、水中養生と同程度になった。しかし、材齢 14 日目以降から強度が低下した。材齢 14 日目までは供試体中の水分の残存に

より、強度が増加したことが考えられる。しかし、材齢の経過とともに供試体内部の水分が減少したため、強度を発現させるほどのポズラン反応が発生しなかったことが挙げられる。また、分級灰を用いた F10 のみが材齢 7 日から強度が低下した。これは、比表面積の増加によって反応が促進され、供試体中の水分が消費されたため、収縮量が大きくなることで、早期の段階でひび割れが発生したためと考えられる。また、燃焼灰の特徴である高い吸水率と多孔質な点は、細骨材としての利用が進められているクリンカと類似している¹⁰⁾。そのため、供試体

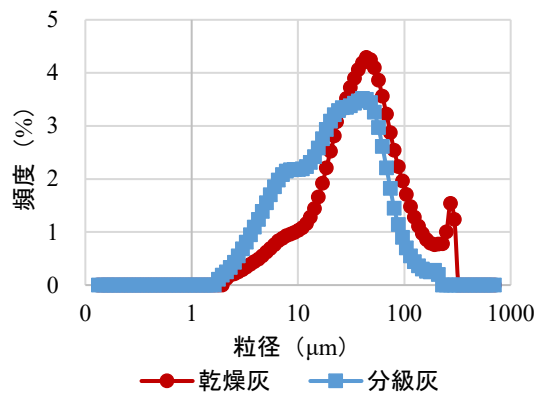


図-5 粒度分布

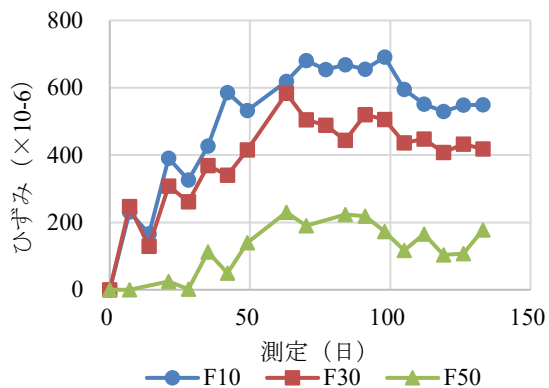


図-6 長さ変化（乾燥灰：水中養生）

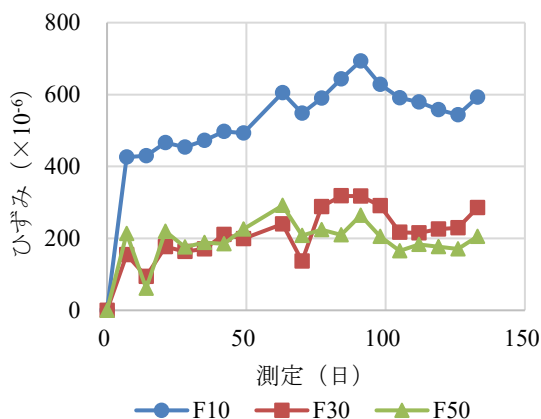


図-7 長さ変化（分級灰：水中養生）

内部に残っている未反応の燃焼灰が骨材の役割を担っており、供試体内部で拘束力が発生している可能性がある。

いずれの養生環境下においても、燃焼灰を分級することで全体的に強度が増進した。また、乾燥灰と比較して分級灰の密度が大きくなっている。これらから、分級により燃焼灰中の粗大粒子が除去され、密度および比表面積が増加し、反応が促進されたことが考えられる。また、水中養生環境下においてフライアッシュ置換率が低下すると、分級灰の初期強度の増加率が大きくなっていた。これは、燃焼灰の使用量減少による、消石灰とフライアッシュの比表面積割合の増加が影響していると考えられる。

各灰の粒度分布を図-5に示す。粒径0.15mm(150μm)以上の範囲において、乾燥灰では粒子の頻度が増加しているが、分級灰では粒子が確認できなかった。また、別種の燃焼灰であるフライアッシュでは、粒径125μm以上に炭素質粒子が含まれている¹¹⁾。そのため、分級を行うことで燃焼灰中の未反応成分である未燃炭素を除去でき、カルシウムの割合が増加したことで強度を促進させた可能性が示唆される。

3.4 長さ変化試験

長さ変化試験の結果について、乾燥灰を利用し水中養

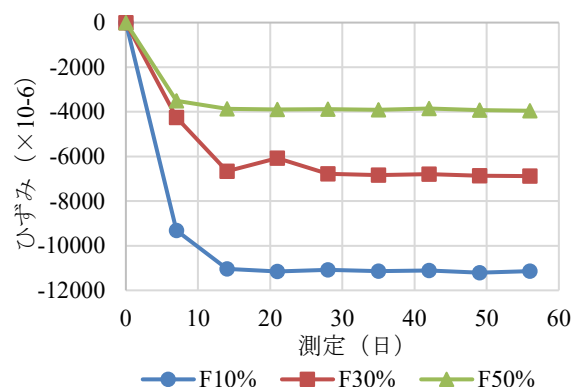


図-8 長さ変化（乾燥灰：気中養生）

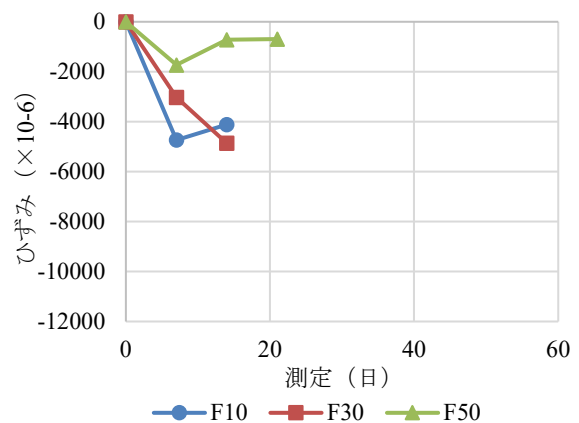


図-9 長さ変化（分級灰：気中養生）

生を行ったものを図-6, 分級灰を利用し水中養生を行ったものを図-7, 乾燥灰を利用し気中養生を行ったものを図-8, そして分級灰を利用し気中養生を行ったものを図-9 に示す。なお, F50 は硬化が遅かったため, 全供試体のコンタクトチップの貼り付けは材齢 7 日目に行った。材齢 7 日目に初期値を測定し, この時のひずみは 0 とした。

全体的な傾向として, フライアッシュ置換率の低下に伴い, 長さ変化量が大きくなった。これは, 燃焼灰が多孔質材料で, 吸水率が高いことが関係していると考えられる。水中養生下では, 水和反応に必要な量よりも多くの水分を吸収するため, 膨張量が増加したことが考えられる。気中養生下では, 養生時に蓄えられていた燃焼灰中の余剰水が逸散したため, 収縮量が増加したことが考えられる。また, 水結合材比が高いこと, そして今回は測定していないが弾性係数が小さいことも想定されるため, 収縮が大きくなったと考えられる。

水中養生下では, 全ての供試体が膨張した。これは, 供試体が反応する過程で水分を吸収したことが考えられる。また, 分級灰の F10 では長さ変化の測定 7 日目で急激に膨張したのに対し, 乾燥灰の F10 は材齢の経過とともに徐々に膨張した。これは, 燃焼灰を分級することによって, 初期材齢における反応が促進された可能性が考えられる。

気中養生下において, 乾燥灰の供試体は測定 14 日まで収縮していたが, それ以降は収縮によるひずみは発生しなかった。これは, 初期の材齢において水和反応が進行していたが, 水分が減少したために, 収縮が発生しなくなったことが考えられる。分級灰の供試体は早期の材齢で崩壊していたが, 測定 7 日目を以降におけるひずみは乾燥灰より小さかった。これは, 測定を行わなかった材齢 7 日までの初期段階で反応が大きく進行したことで, 収縮量が乾燥灰より大きくなった可能性が挙げられる。そのため, 硬化が比較的早い F10 の供試体を用いて, 初期材齢における分級灰と乾燥灰のひずみを比較する必要がある。

4. まとめ

本研究では, 産業廃棄物である木質バイオマス燃焼灰のセメント置換材としての有効利用および建設資材としての初期強度増進を目的とした。そのため, 燃焼灰に消石灰およびフライアッシュを加えたセメントレス硬化体を作成し, 燃焼灰の各処理方法における基礎的物性の検討を実施した。空気量試験, スランプ試験, フロー試験, 圧縮強度試験および長さ変化試験から得られた知見を下記に示す。

(1) 分級灰を用いた供試体中の空気量は乾燥灰に比べ

て大きく低下した。また, スランプフロー値の結果から, 分級灰を使用することで流動性が低下した。

- (2) 分級灰を用いることで, 養生方法に関わらず供試体の初期強度が増加し, 燃焼灰の使用量増加に伴い, 強度の増加率は大きくなった。
- (3) 気中養生下における圧縮強度は, 分級灰の F10 を除くすべての供試体で材齢 14 日から 28 日にかけて低下した。そして, 分級灰を用いた供試体は材齢 91 日までに崩壊していた。
- (4) 水中養生下において, 分級灰を用いた供試体のひずみは乾燥灰のものに比べて, 材齢初期におけるひずみが増加していた。しかし, 材齢の経過によるひずみ増加は初期材齢と比較すると小さかった。

参考文献

- 1) 池美乃理ら：国内の FIT 認定木質バイオマス発電施設における燃焼灰発生量推計, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.31, pp.169-178, 2020.11
- 2) 田島孝敏ら：木質バイオマス発電燃焼灰の有効利用に関する研究, 大林組技術研究所報, No.84, 2020.12
- 3) 高岡昌輝ら：我が国におけるごみ焼却残渣および木質バイオマス燃焼灰の発生量, pp.40-47, 2020.11
- 4) 弘瀬密樹ら：分級した木質バイオマス燃焼灰を用いたセメントレス材料の基礎性状, 第 32 回プレストレストコンクリートシンポジウム年次論文集, pp.405-410, 2023.10
- 5) 鈴木麻由ら：木灰を用いたバイオマスコンクリートの開発, 令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, Vol.74, V-538, 2019.9
- 6) 片山諒辰：木灰と消石灰を用いたコンクリートの強度発現, 高知工科大学卒業論文, pp.1-2, 2015.3
- 7) 裴芸蘭ら：木質バイオマス燃焼灰中有害金属含有量および溶出量の調査, 第 33 回廃棄物資源循環学会研究発表会, pp.73-74, 2022
- 8) 鈴木真理子ら：木質バイオマス燃焼灰を活用した植栽基盤ポーラスコンクリートの開発に向けた基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1138-1143, 2022.7
- 9) 山本武志ら：フライアッシュのポズラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集, Vol.63, No1, pp.52-65, 2007.1
- 10) 廣川一巳ら：多孔質材料(クリンカ)を用いたモルタルに関する練り混ぜ方法の検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp.1377-1378, 2010.9
- 11) 陳勇ら：微粉炭燃焼 フライアッシュ中の炭素分の性状, 日本エネルギー学会誌, pp.748-752, 1993.11