

論文 焼成時間の異なる電気炉酸化スラグ粗骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性

伊藤 洋介*1・横田 太志*2・横井 奨*3・河辺 伸二*4

要旨：電気炉酸化スラグ粗骨材(以下、EFG とする)を用いたコンクリートは、EFG を予め 1000℃で 24 時間焼成することで、加熱温度 500℃での供試体のひび割れを抑制できる。より短い焼成時間でひび割れを抑制できれば焼成した EFG をより安価に製造できるが、焼成時間 24 時間未満の EFG の高温環境下におけるひび割れ抑制効果は検討されていない。本研究では、焼成時間の異なる EFG を用いたコンクリートの高温加熱後のひび割れを観察し、圧縮強度と弾性係数を測定した。その結果、加熱温度 600℃において、焼成時間 8 時間以上で、圧縮強度残存比と弾性係数残存比に大きな差は見られず、供試体外観にひび割れが生じなかった。

キーワード：コンクリート、電気炉酸化スラグ、圧縮強度、弾性係数、高温加熱、焼成、ひび割れ

1. はじめに

電気炉酸化スラグは、水和により膨張・崩壊する恐れのある遊離石灰や遊離マグネシアが含まれていることからコンクリート骨材として利用されていなかった。しかし現在は製鋼法の改善により、電気炉酸化スラグ粗骨材(以下、EFG とする)は所要の品質が得られることを確認してから使用することが可能になった¹⁾。EFG を用いたコンクリートは電波吸収性能や放射線遮蔽性能が期待できるため、建築物の壁面等への使用が想定される。

しかし EFG を用いたコンクリートは、500℃で加熱することで、写真-1(b)のように供試体にひび割れが生じ、EFG を用いないコンクリートに比べて圧縮強度と弾性係数(以下、弾性係数とする)が大きく低下すると分かった^{2,3)}。これは、高温加熱で EFG に多く含まれる Wustite が Magnetite に組成変化し、EFG が体積膨張したためと考える。これにより、EFG を用いたコンクリートによる建築物は火災で広範囲に強度低下し、被害が大きくなることが懸念される。

著者らは、焼成した EFG を用いたコンクリートの力学的特性を明らかにすることで、圧縮強度の低下が EFG の熱劣化によるものかを検討し、EFG の熱劣化が高温加熱後のコンクリートの圧縮強度に与える影響は小さい⁴⁾ことを示した。また、EFG を予め 1000℃で 24 時間焼成し、体積膨張させた後に骨材として用いることで、加熱温度 500℃で EFG を用いたコンクリートの供試体のひび割れを抑制でき、圧縮強度と弾性係数の低下について EFG を用いないコンクリートと同等にできる⁵⁾ことが分かった。

現在検討されている焼成に要する温度保持時間(以下、焼成時間とする)は 24 時間のみである。焼成時間は 24

時間未満であってもひび割れを抑制できる見込みがあり、現状ではエネルギーを過剰に消費して EFG の製造コストが不要に高くなる恐れがある。しかし、焼成時間の違いによる EFG を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性について検討されていないため、適切な焼成時間は不明である。

そこで本研究では、焼成時間による EFG の組成変化について調べ、焼成時間の違いが供試体のひび割れに及ぼす影響を明らかにする。これにより、ひび割れの生じない焼成した EFG を安価に作製するための最低限の焼成時間を明らかにし、建築分野において EFG の利用を促進することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 供試体

φ100×200mm の円柱供試体とする。打設から 24 時間後に脱型し、4 週間水中養生する。また打設日から 1 週間後に載荷面の研磨を行う。

2.2 使用材料

表-1 に使用材料の品質を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は豊田市産山砂、粗骨材は同



(a) EFG0%

(b) EFG100%

写真-1 500℃で加熱後の供試体の外観

*1 名古屋工業大学大学院 准教授・博士(工学) (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 社会工学系プログラム (学生会員)

*3 大成建設株式会社

*4 名古屋工業大学大学院 教授・工博 (正会員)

一ロットの徐冷した EFG を使用し、図-1 に示す粗骨材の焼成方法の概要に基づき焼成する。粗骨材の焼成時間は未焼成と 0, 0.5, 1, 2, 8, 12, 24 時間の 8 水準とする。また、組成変化による体積膨張を調べるために、JIS A 1110:2020 に基づいて、粗骨材の表乾密度を測定した。表-2 に焼成時間ごとの EFG の表乾密度を示す。焼成時間が長いほど表乾密度は低くなっている。これは Wustite が Magnetite に組成変化し、EFG が体積膨張したためと考える。混和剤として、高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸コポリマーを使用する。

2.3 調合

表-3 にコンクリートの調合を示す。EFG の焼成時間の違いによる加熱後の圧縮強度と弾性係数の変化を把握するため、調合は供試体ごとに変更せず、水セメント比 50%, 単位水量 170kg/m³, 細骨材率 48.0%のみとする。コンクリートの目標スランブ値を 18.0±2.5cm とし、高性能 AE 減水剤を使用し目標スランブ値になるように調

表-1 使用材料の品質

骨材の種類	粗粒率	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)
EFG	6.55	0.85	3.74
砂利	6.82	1.19	2.60
砂	2.78	1.59	2.55

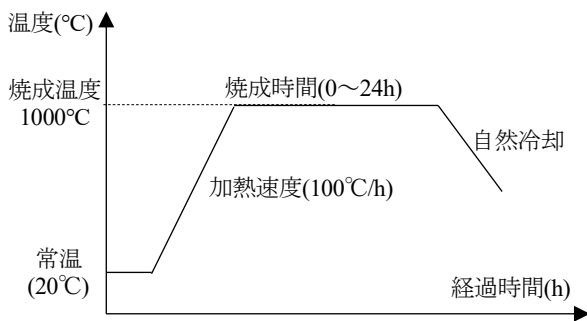


図-1 粗骨材の焼成方法の概要

表-2 焼成時間ごとの EFG の表乾密度

焼成時間 (h)	0	0.5	1	2	8	12	24
表乾密度 (g/cm ³)	3.67	3.66	3.62	3.61	3.60	3.59	3.58

整する。また、EFG はワーカビリティや耐凍害性を確保するため空気量を 1%程度大きくすることが推奨されている^り。そのため、目標空気量を 5.5±1.0%とする。

2.4 加熱条件

表-4 に実験条件を示す。原田によれば^り、一般にコンクリートは、500℃以上で加熱された際に大きな亀裂を発生し、構造材料としての利用は困難となる。また、EFG を用いたコンクリートの圧縮強度と弾性係数は、供試体の加熱温度（以下、加熱温度とする）500℃で大きく低下する^り。そのため、本実験では加熱温度の上限を 500℃以上の 600℃とし、加熱温度は 100, 200, 400, 500, 600℃とブランクとしての常温 20℃とする。

3. 実験内容

3.1 破砕値試験^りの方法

図-2 に破砕値試験の断面図を示す。破砕値試験は BS 812 Testing aggregates-Part 110 : Methods for determination of aggregate crushing value (ACV) を参考にし、測定する。

粗骨材をふるいで粒径 10~14mm に選別し、未焼成の粗骨材を 105±5℃の乾燥機で 4 時間乾燥させる。粗骨材を容器に移して粗骨材の上にプランジャーを置き、荷重速度 40kN/min で 400kN まで載荷する。載荷後、2.5mm のふるいを使用し通過した粗骨材の質量の全粗骨材の質

表-4 実験条件

項目	摘要	水準数
加熱温度(℃)	常温(20), 100, 200, 400, 500, 600	6
焼成時間(h)	未焼成, 0, 0.5, 1, 2, 8, 12, 24	8

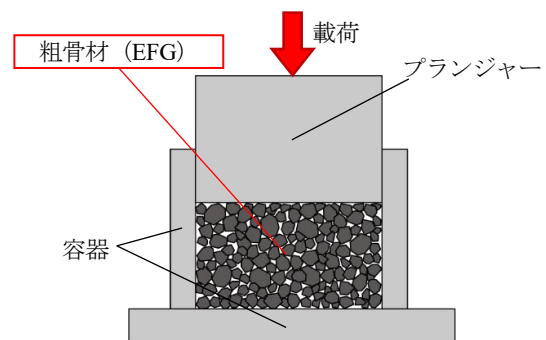


図-2 破砕値試験の断面図

表-3 コンクリートの調合

焼成時間 (h)	水セメント比 (W/C) (%)	細骨材率 (s/a) (%)	単位質量(kg/m ³)				高性能 AE 減水剤 (×C%)	スランブ値 (cm)	空気量 (%)
			水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	EFG			
未焼成	50	48.0	170	340	821	1297	0.70	16.5	4.8
0						1265		17.0	5.5
0.5						1262		19.0	5.8
1						1247		18.5	6.0
2						1244		16.5	5.0
8						1240		17.5	5.1
12						1238		18.5	5.3
24						1236		18.5	4.6

量に対する割合を百分率で表し、2 回の測定結果の平均値を整数で表したものを破砕値とする。

3.2 加熱方法

図-3 に供試体の加熱方法の概要を示す。加熱にはプログラム機能付き電気炉を用いる。既往の研究⁸⁾より、供試体の内外温度差と供試体内部における温度分布の不均一さによる熱応力の影響を小さくするため、加熱速度は 100℃/h とする。予備加熱は 60℃で 3 時間行う。また各加熱温度到達後、供試体内部の温度を均一にするため、加熱温度を 24 時間保持した後に、自然冷却を行う。

3.3 加熱後供試体の外観の観察

加熱温度 500℃および 600℃で加熱した供試体を自然冷却し、常温まで冷ました供試体の外観を観察し、高温加熱による供試体の外観の変化を把握する。

3.4 圧縮強度と弾性係数の測定

JISA 1108 : 2018 と JISA 1149 : 2017 に基づいて、アムスラー型万能圧縮試験機とコンプレッソメータを用いて荷重と変位を測定し、圧縮強度と弾性係数を算出する。

加熱温度 500℃における圧縮強度と弾性係数をそれぞれの常温時の値で除した値（以下、残存比とする）を算出する。圧縮強度残存比と弾性係数残存比により、コンクリートの圧縮強度と弾性係数について、高温加熱による変化のみが比較できる。

3.5 加熱後供試体のひび割れの評価について

焼成時間の違いが供試体内部のひび割れ量の変化に及ぼす影響を定量的に評価するために、既往の研究⁹⁾を参考にして、蛍光エポキシ樹脂含浸法を行う。図-4 に蛍光エポキシ樹脂含浸法によるひび割れ部分の判定方法を示す。

加熱後の供試体に蛍光エポキシ樹脂を含浸させた後、蛍光エポキシ樹脂の硬化後に切断する。供試体の切断面に、ブラックライトを照射しカメラで撮影する。撮影した写真を画像解析ソフト（NIH 製 ImageJ）で二値化し、各断面積中のひび割れ部が占める面積 $t[\text{mm}^2]$ を求める。 t および供試体の切断面の面積 $s[\text{mm}^2]$ を用いて、切断面のひび割れ部の面積率 $C[\%]$ を式(1)で表す。

$$C = \frac{t}{s} \times 100 \tag{1}$$

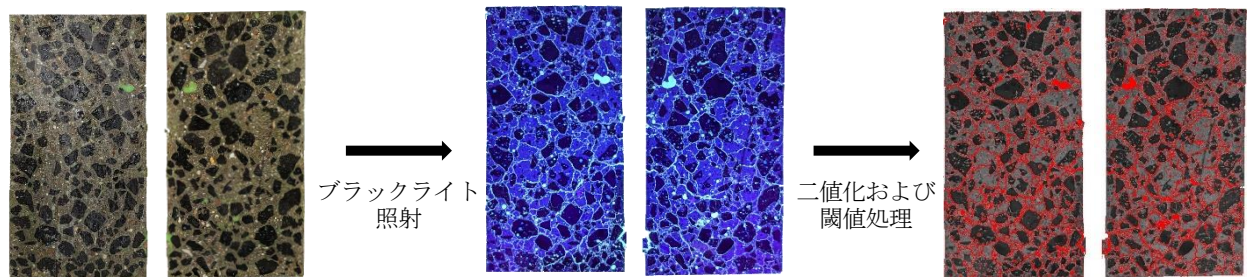


図-4 蛍光エポキシ樹脂含浸法によるひび割れ部分の判定方法

ひび割れの面積率 C により、焼成時間の違いが供試体内部のひび割れ量の変化に及ぼす影響を定量的に評価することができる。

4. 実験結果

4.1 破砕値試験の結果

表-5 に焼成時間ごとの EFG の破砕値を示す。EFG の破砕値は、焼成時間が長いほど小さくなり、骨材強度が僅かに上昇すると考える。そのため、焼成時間が長くなることによる骨材の熱劣化の影響を考慮する必要はないと考える。

4.2 加熱後供試体の外観の観察

表-6 に加熱温度 500℃および 600℃で加熱後の供試体の外観を示す。

表-6 より、加熱温度 500℃では未焼成から焼成時間 1 時間まで、加熱温度 600℃では未焼成から焼成時間 2 時間までは供試体表面にひび割れが生じており、これ以降（焼成時間 12 時間、24 時間の写真は省略する）では供試体表面にひび割れは見られない。このため、加熱後のコンクリートの美観を考慮する場合、焼成時間は 8 時間以上が望ましい。なお、供試体にひび割れが生じる場合、加熱温度 600℃は加熱温度 500℃と比較して、いずれの焼成時間でも、大きなひび割れが生じる。

ひび割れ量の変化の要因を調べるために、焼成時間ごとに EFG の X 線回折を行った。表-7 に焼成時間ごとの

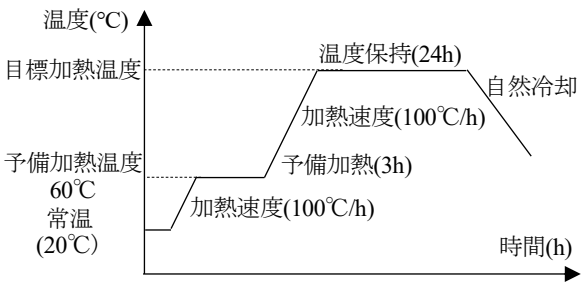
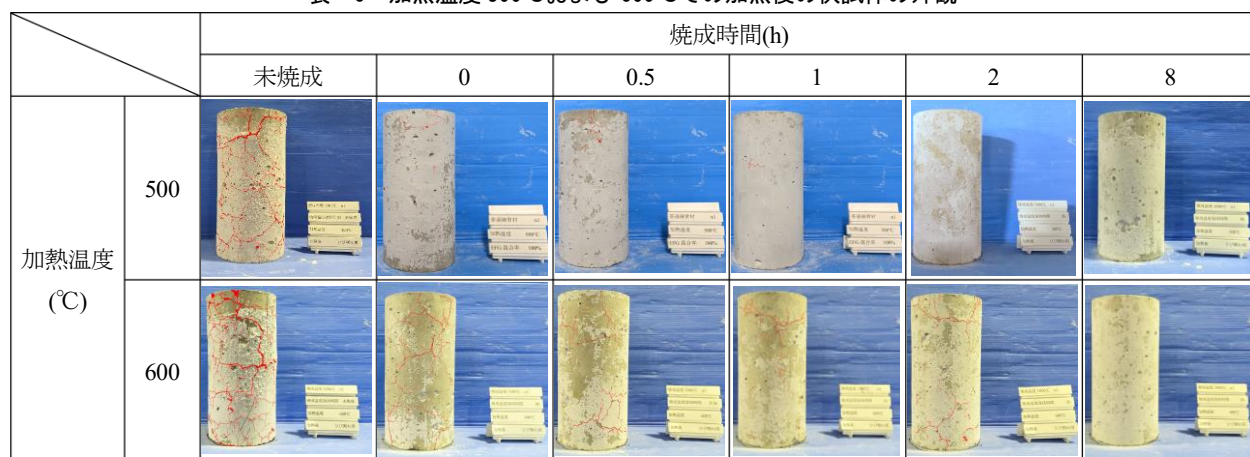


図-3 供試体の加熱方法の概要

表-5 焼成時間ごとの EFG の破砕値

焼成時間(h)	未焼成	0	0.5	1	2	8	12	24
破砕値(%)	22.3	22.6	22.9	21.6	21.7	20.8	20.7	20.4

表－6 加熱温度 500℃および 600℃での加熱後の供試体の外観



表－7 徐冷スラグの組成概算値(wt%)

焼成時間 (h)	Wustite (FeO)	Magnetite (Fe ₃ O ₄)	Hematite (Fe ₂ O ₃)	Magnesium Iron- Aluminum-Oxid (MgFeAlO ₄)	Gehlenite (Ca ₂ Al ₂ SiO ₇)	Kirschsteinite (CaFeSiO ₄)	Andradite (Ca ₂ Fe ₂ (SiO ₄) ₃)
未焼成	39	0	0	25	23	13	0
0	11	20	21	19	19	10	0
0.5	10	21	21	21	17	10	0
1	8	24	21	20	19	8	0
2	7	24	22	22	18	7	0
8	0	27	22	22	14	8	7
12	6	30	19	21	16	8	0
24	0	26	26	20	15	0	13

徐冷スラグの組成概算値を示す。

表－7 より焼成時間 8 時間までは焼成時間が長いほど Wustite が減少し、焼成時間 12 時間までは Magnetite が増加する。このことおよび表－2 から、焼成時間 8 時間以上では、骨材として用いる前に EFG が予め十分に体積膨張するため、供試体表面に加熱によるひび割れが生じないと考ええる。

4.3 蛍光エポキシ樹脂含浸法

表－8 に蛍光エポキシ樹脂含浸後の加熱後供試体の切断面を、図－5 に切断面のひび割れ部の面積率と焼成時間の関係を示す。

表－8 と図－5 より、供試体内部のひび割れ量は、加熱温度 500℃および 600℃ともに未焼成が最も多く、焼成時間 1 時間までは、焼成時間が長いほど少なくなる。焼成時間 1 時間以上（焼成時間 12 時間、24 時間の写真は省略する）では加熱による供試体内部のひび割れ量の変化は少ない。加熱温度 600℃は、加熱温度 500℃と比較して、いずれの焼成時間においてもひび割れ量が大きくなる。

4.4 圧縮強度

表－9 に EFG の焼成時間ごとの各加熱温度における圧縮強度を、図－6 に EFG の各焼成時間における圧縮強度

残存比と加熱温度の関係を示す。

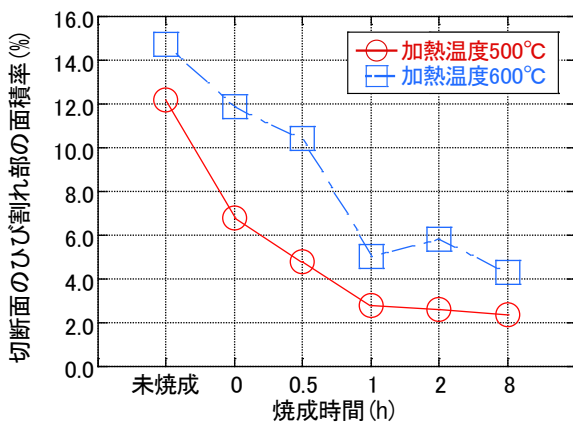
表－9 より、常温時において焼成時間による圧縮強度の差は小さい。加熱温度が高くなるにつれて、およそ圧縮強度は低下傾向にあるが、特に未焼成では加熱温度 500℃から急激に圧縮強度が低下する。加熱温度 500℃以上における圧縮強度の低下は焼成時間が長いほど低下量が小さくなる（圧縮強度が高くなる）。加熱温度 500℃においては焼成時間 2 時間以上、加熱温度 600℃においては焼成時間 8 時間以上で低下量の変化が小さい。ここで、表－2 より焼成時間が長いほど EFG の表乾密度が小さくなっており、表－7 より焼成時間が長いほど Wustite が Magnetite に変化している。これにより、加熱温度 500℃では焼成時間 2 時間以上、加熱温度 600℃では焼成時間 8 時間以上において、EFG が骨材として用いる前に予め十分に膨張することによって、供試体加熱時における供試体内部での EFG の膨張が少なくなったと考える。

加熱温度 400℃以上では、いずれの焼成時間においても、加熱温度が高くなるほど圧縮強度が低下する。これは、EFG の体積膨張による供試体のひび割れの影響だけでなく、加熱によるセメントペーストの劣化の影響によると考える。

図－6 より、加熱温度 500℃において未焼成では圧縮

表－8 蛍光エポキシ樹脂含浸後の加熱後供試体の切断面

		焼成時間(h)											
		未焼成		0		0.5		1		2		8	
加熱温度 (°C)	500												
	600												



図－5 切断面のひび割れ部の面積率と焼成時間の関係

強度残存比は 2 割程度まで低下し、加熱温度 600°Cにおいて 1 割程度となる。加熱温度 500°Cでは、焼成時間 2 時間まで、加熱温度 600°Cでは、焼成時間 8 時間まで焼成時間が長いほど圧縮強度残存比が大きくなる。加熱温度 500°Cでは、圧縮強度残存比は焼成時間 0 時間で 4 割程度となり、焼成時間 2 時間で 6 割程度となる。焼成時間 2 時間以上では圧縮強度残存比に大きな差は見られない。加熱温度 600°Cでは、焼成時間 0 時間で 1 割程度となり、焼成時間 8 時間以上で 4 割程度となる。焼成時間 8 時間以上では圧縮強度残存比に大きな差は見られない。

以上より、加熱温度 500°Cにおいて焼成時間 2 時間以上、加熱温度 600°Cにおいて焼成時間 8 時間以上で圧縮強度残存比に大きな差は見られないため、焼成時間は 8 時間以上が望ましい。

4.5 弾性係数

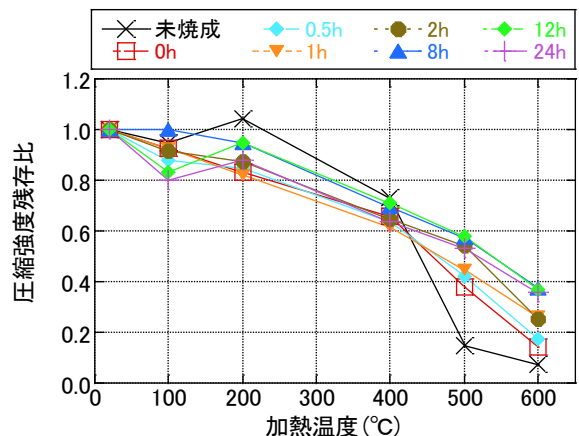
表－10 に EFG の焼成時間ごとの各加熱温度における弾性係数を、図－7 に EFG の各焼成時間における弾性係数残存比と加熱温度の関係を示す。

表－10 より、常温時において弾性係数に大きな差はない。焼成時間が弾性係数に与える影響は小さいと考える。また、各焼成時間において、加熱温度が高いほど弾性係数は低下する。加熱温度 400°Cまでは焼成時間の違いに

表－9 焼成時間ごとの各加熱温度における圧縮強度

			加熱温度(°C)						
			常温	100	200	400	500	600	
焼成時間 (h)	未焼成	平均	42.30	40.14	44.16	30.98	6.27	3.14	
		変動係数	0.059	0.018	0.041	0.007	0.036	0.113	
	0	平均	42.87	39.69	35.55	28.23	16.19	6.16	
		変動係数	0.055	0.025	0.020	0.032	0.219	0.018	
	0.5	平均	44.53	39.15	37.75	28.33	18.81	7.74	
		変動係数	0.015	0.027	0.030	0.026	0.019	0.026	
	1	平均	44.11	40.92	36.34	27.25	19.75	11.66	
		変動係数	0.027	0.010	0.023	0.039	0.091	0.004	
	2	平均	44.38	40.60	38.84	28.70	24.01	11.32	
		変動係数	0.005	0.017	0.003	0.038	0.052	0.061	
	8	平均	41.25	41.24	39.12	28.70	23.67	15.45	
		変動係数	0.003	0.004	0.009	0.015	0.063	0.025	
	12	平均	40.98	34.19	38.76	29.11	23.67	15.20	
		変動係数	0.031	0.008	0.010	0.007	0.052	0.028	
	24	平均	43.64	34.85	38.46	27.82	23.29	15.54	
		変動係数	0.016	0.043	0.011	0.034	0.031	0.005	

*供試体は各条件で 3 体とする。ただし加熱温度 600°Cおよび供試体の破損または異常な値が見られる場合、2 体とした。



図－6 圧縮強度残存比と加熱温度の関係

よる弾性係数の違いは見られない。加熱温度 500°Cにおいて、焼成時間 8 時間までは、焼成時間が長いほど弾性係数は高くなり、焼成時間 8 時間以降では、弾性係数は同程度となる。また、加熱温度 600°Cでは、いずれの焼成時間においても、弾性係数に大きな差は見られない。

図－7 より、弾性係数残存比で確認すると、加熱温度

表-10 焼成時間ごとの各加熱温度における弾性係数

			加熱温度(℃)					
			常温	100	200	400	500	600
焼成時間 (h)	未焼成	平均	36.40	28.90	23.07	12.33	0.25	0.10
		変動係数	0.003	0.056	0.012	0.146	0.200	0.000
	0	平均	32.40	26.53	20.83	12.10	2.70	0.50
		変動係数	0.004	0.037	0.012	0.036	0.370	0.000
	0.5	平均	31.30	27.75	20.00	12.67	3.65	0.80
		変動係数	0.003	0.004	0.018	0.039	0.041	0.125
	1	平均	32.67	27.93	20.10	12.00	4.10	1.35
		変動係数	0.033	0.022	0.032	0.069	0.049	0.037
	2	平均	33.35	27.20	19.95	13.63	5.60	1.15
		変動係数	0.026	0.006	0.018	0.065	0.116	0.043
	8	平均	34.20	28.13	20.87	12.50	7.37	2.35
		変動係数	0.025	0.023	0.022	0.068	0.117	0.021
	12	平均	33.47	28.07	20.47	13.07	7.10	2.20
		変動係数	0.021	0.006	0.037	0.095	0.144	0.000
	24	平均	33.50	27.77	20.80	12.47	6.53	2.20
		変動係数	0.027	0.015	0.034	0.025	0.069	0.000

*供試体は各条件で3体とする。ただし加熱温度 600℃および供試体の破損または異常な値が見られる場合、2体とした。

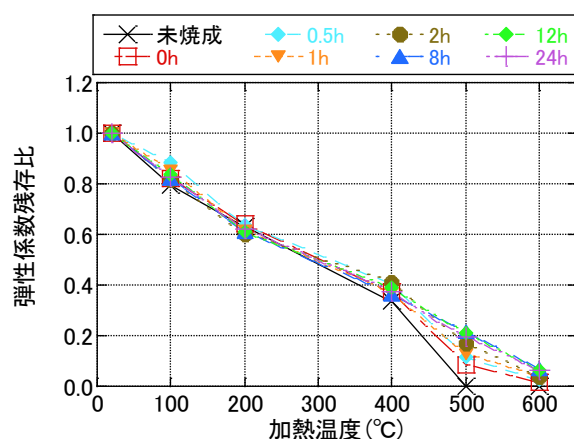


図-7 弾性係数残存比と加熱温度の関係

500℃における各焼成時間の違いによる弾性係数の違いが、より明確となる。いずれの焼成時間においても加熱温度が高いほど弾性係数残存比は低下する。

以上より、加熱温度 500℃において焼成時間 8 時間以上で弾性係数残存比に大きな差は見られないため、焼成時間は 8 時間以上が望ましい。

5. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが分かった。

- 1) EFG の破砕値は、焼成時間が長いほど小さくなるため、焼成時間が長くなることによる骨材の熱劣化の影響を考慮する必要はない。
- 2) 加熱温度 600℃では未焼成から焼成時間 2 時間までは供試体にひび割れが生じるため、加熱後のコンクリートの美観を考慮する場合、焼成時間は 8 時間以上が望ましい。
- 3) 焼成時間 8 時間以上では、骨材として用いる前に EFG が予め十分に体積膨張するため、供試体表面に加熱によるひび割れが生じないと考える。

- 4) 焼成時間 1 時間以上では加熱による供試体内部のひび割れ量の変化は少ない。
- 5) 加熱温度 600℃において焼成時間 8 時間以上で圧縮強度残存比に大きな差は見られないため、焼成時間は 8 時間以上が望ましい。
- 6) 加熱温度 500℃において焼成時間 8 時間以上で弾性係数残存比に大きな差は見られないため、焼成時間は 8 時間以上が望ましい。

謝辞 本研究の一部は、公益財団法人日比科学技術振興財団令和 4 年度研究助成金の助成・支援を受けたものです。混和剤は株式会社竹本油脂に、EFG は株式会社星野産商にご提供いただきました。実験の実施にあたり名古屋工業大学田中凜氏の協力を得ました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案), 2003.3
- 2) 横田太志, 伊藤洋介, 河辺伸二, 横井奨: 粗骨材に電気炉酸化スラグを用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.311-316, 2021.7
- 3) 伊藤洋介, 河辺伸二, 横井奨, 横田太志: 電気炉酸化スラグ粗骨材と細骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.317-322, 2021.7
- 4) 伊藤洋介, 河辺伸二, 古市奈々, 横田太志: 焼成後の電気炉酸化スラグ粗骨材を用いたコンクリートの力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.274-279, 2022.7
- 5) 横田太志, 伊藤洋介, 河辺伸二, 古市奈々, 山元明日香: 焼成した電気炉酸化スラグ粗骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性について, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.60, No.1, pp.45-48, 2022.2
- 6) 原田有: 高熱を受けたコンクリートの強度と弾性的変化(第 3 報, 強度と弾性の自然回復), 日本建築学会論文報告集, Vol.56, pp.1-7, 1957.6
- 7) 鶴田浩章, 松下博通, 陶佳宏: 粗骨材の破砕値が及ぼす高強度コンクリートの圧縮強度への影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.991-996, 1998.6
- 8) 河辺伸二, 岡田和寿, 滝本憲太: 再生骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.783-788, 2007.7
- 9) 岩城圭介, 加藤淳司, 平間昭信, 塩谷智基: 微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.999-1004, 2004.7