

〈特別研究課題〉 電気炉酸化スラグ混入コンクリートの熱劣化の改善

助成研究者 名古屋工業大学 伊藤 洋介



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
(名古屋工業大学)

Mechanical Properties after High Temperature Heating of Concrete Using Electric Arc
Furnace Oxidizing Slag as Coarse Aggregate with Different Calcination Times

Yosuke Ito
(Nagoya Institute of Technology)

Abstract :

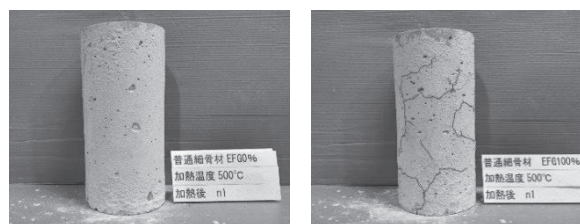
For concrete using electric arc furnace oxidation slag coarse aggregate (hereinafter referred to as EFG), cracking of specimens at a heating temperature of 500°C can be suppressed by pre-calcining EFG at 1000°C for 24 hours. Although calcined EFG can be manufactured at lower cost if cracking can be suppressed with shorter calcining time, the effect of EFG calcined for less than 24 hours on cracking suppression in high temperature environments has not been investigated. In this study, cracking of concrete made of EFG with different calcining times was observed after heating to high temperatures, and compressive strength and modulus of elasticity were measured. As a result, there was no significant difference in the residual ratio of compressive strength and the residual ratio of modulus of elasticity at a heating temperature of 600°C and a calcining time of 8 hours or longer, and no cracks were observed on the exterior of the specimens.

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静弾性係数(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。



(a) EFG0% (b) EFG100%
写真-1 500℃で加熱後の供試体の外観

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

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。

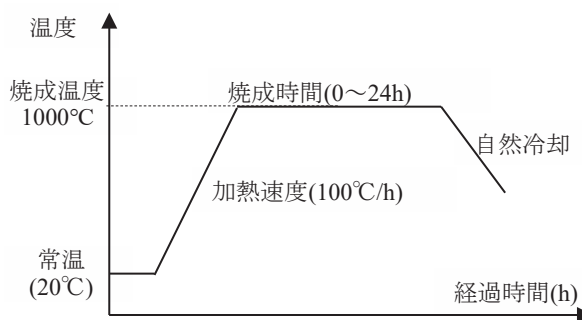


図-1 粗骨材の焼成方法の概要

2.3 調査

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、調査は供試

体ごとに變更せず、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プ値を18.0±2.5cmとし、高性能AE減水剤を使用し目標スランプ値になるように調整する。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¹⁾。そのため、目標空気量を5.5±1.0%とする。

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

2.4 加熱条件

表-4に実験条件を示す。原田によれば⁶⁾、一般にコンクリートは、500°C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°Cで大きく低下する²⁾。そのため、本実験では加熱温度の上限を500°C以上の600°Cとし、加熱温度は100, 200, 400, 500, 600°Cとブランクとしての常温20°Cとする。

3. 実験内容

3.1 破砕値試験⁷⁾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。

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%)	スランプ値(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	0.70	16.5	4.8	
0									1297
0.5									1265
1									1262
2									1247
8									1244
12									1240
24									1238
									1236

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碎値とする。

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

JIS A 1108：2018とJIS A 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

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

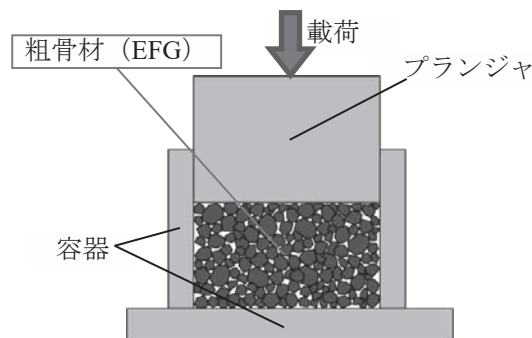


図-2 破碎値試験の断面図

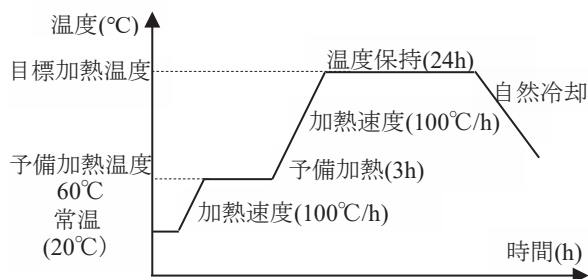


図-3 供試体の加熱方法の概要

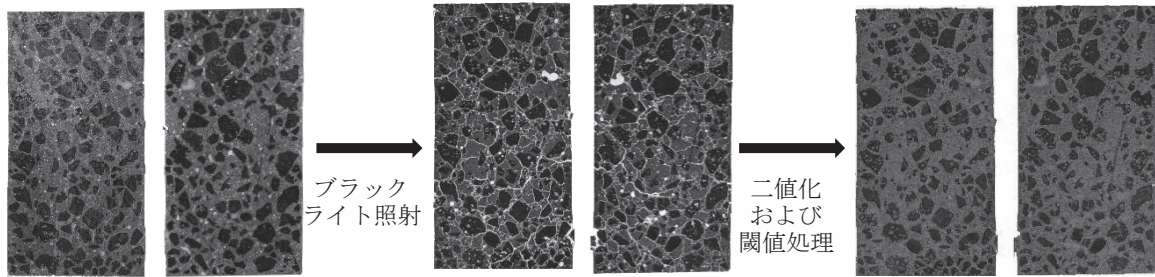


図-4 蛍光エポキシ樹脂含浸法によるひび割れ部分の判定方法

(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。

$$C = \frac{t}{S} \times 100 \quad (1)$$

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。

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

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

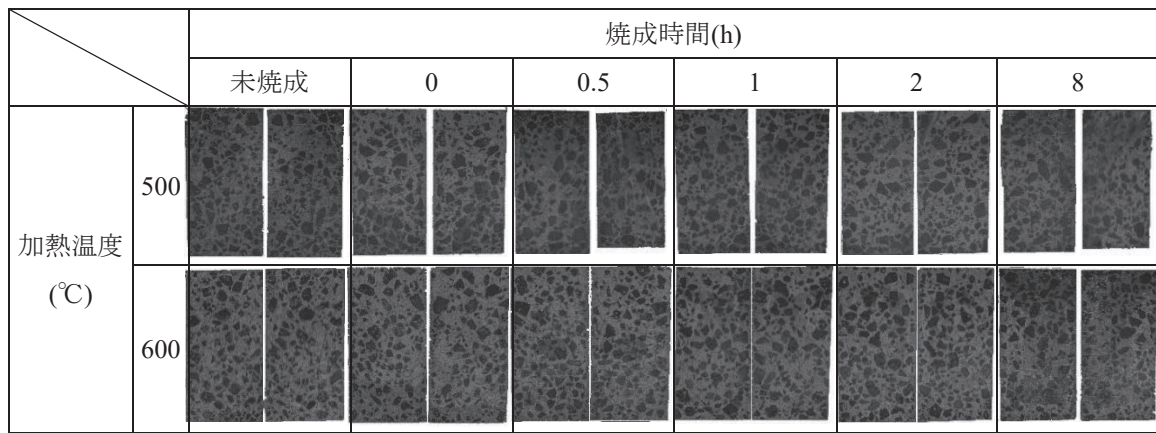
表-6 加熱温度500℃および600℃での加熱後の供試体の外観

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

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

表-8 蛍光エポキシ樹脂含浸後の加熱後供試体の切断面



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時間まで焼成時間が長いほどWustiteが減少し、焼成時間12時間まで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られる。

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。

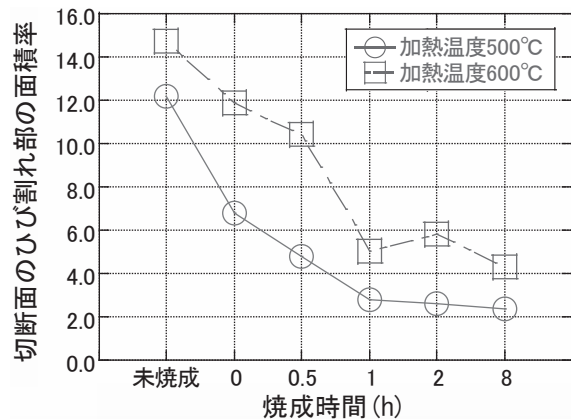


図-5 切断面のひび割れ部の面積率と焼成時間の関係

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強度残存比は2割程度まで低下し、加熱温度600℃において1割程度となる。加熱温度500℃では、焼成時間2時間まで、加熱温度600℃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℃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℃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℃において焼成時間2時間以上、加熱温度600℃において焼成時間8時間

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(℃)						
		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℃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。

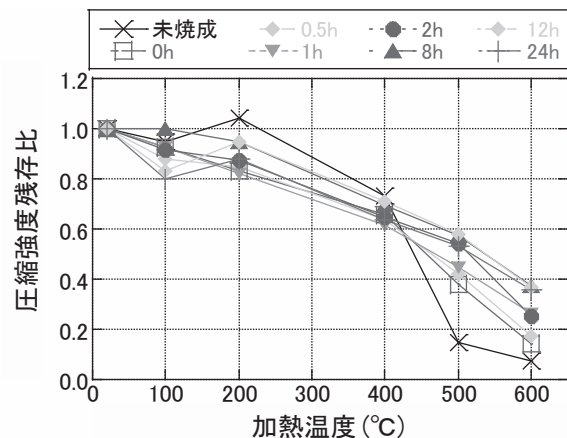


図-6 圧縮強度残存比と加熱温度の関係

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℃までは焼成時間の違いによる弾性係数の違いは見られない。加熱温度500℃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℃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。

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。

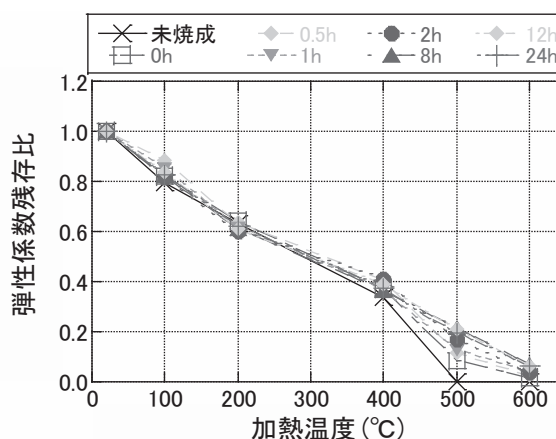


図-7 弾性係数残存比と加熱温度の関係

- 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

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。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の変化(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：粗骨材の破碎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

本報告書はコンクリート工学年次論文集Vol.45に掲載した論文を一部加筆・修正したものである。