

論文 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

横田 太志*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3・横井 奨*4

要旨: 近年、電気炉酸化スラグはコンクリート骨材としての利用促進が期待されている。しかし、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の高温加熱後の力学的特性に関する知見は少なく、高温加熱後の力学的特性を把握することは EFG の利用促進のために重要である。そこで高温加熱前後の単位容積質量、圧縮強度、弾性係数を測定し、加熱後供試体と破断面の観察を行い、EFG を用いたコンクリートの力学的特性を確認した。これにより、EFG を用いたコンクリートの圧縮強度は常温において EFG を用いないコンクリートよりも高くなるが、加熱の影響で低下しやすいことが分かった。

キーワード: 電気炉酸化スラグ, EFG, コンクリート, 高温加熱, 単位容積質量, 圧縮強度, 弾性係数

1. はじめに

電気炉酸化スラグは、鉄スクラップを溶融して粗鋼を生産する際に排出される産業副産物である。かつて、電気炉製鋼法で生成されるスラグは、酸化スラグと還元スラグを分離して取り出すことが困難であり、還元スラグに含まれる遊離石灰や遊離マグネシアがコンクリートを膨張させポップアウトを生じるため、コンクリート用骨材として使用できなかった¹⁾。しかし、現在では製鋼法の改善により、工程の分化がなされたため、電気炉酸化スラグ骨材として JIS A 5011-4 に規定された²⁾。

電気炉酸化スラグは、主に路盤材として利用されているが、未利用のまま堆積されているものも多くある。近年、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²⁾。

また、骨材需要の増加や河川産骨材の利用が抑制されるようになったことから、コンクリート骨材の枯渇が問題となっている。そのため、電気炉酸化スラグをコンクリート骨材として利用することで、骨材不足の解消や自然環境保全、コスト削減などが期待できる。

EFG は普通粗骨材に比べ密度が高いため、建築物の基礎構造や γ 線遮蔽用のコンクリートなどの重量コンクリートに利用することが有効である。

コンクリート構造物は熱の影響を受けると強度特性などの性質が変化するため、長期にわたり熱の影響を受ける可能性のある放射線遮蔽コンクリートや焼却施設のコンクリートに関して、供用時の温度制限値が設けられている³⁾。また、火災時においても高温加熱の影響を受け、コンクリートの性質が変化する。

しかし、EFG を用いたコンクリートの使用実績は少なく、高温加熱時における力学的特性に関する既往の研究は少ない。

そこで、本研究では EFG を用いたコンクリートの高温加熱前後における単位容積質量、圧縮強度、弾性係数の変化について比較し、EFG の高温加熱後の影響について検討を行う。これにより、建築分野における EFG のコンクリート用骨材としての活用を促進する。

2. 実験概要

2.1 供試体

$\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ の円柱供試体とする。打込みから 24 時間後に脱型し、4 週間水中養生する。また打込み日から 1 週間後に載荷面の研磨を行う。供試体本数は、各実験条件に対して 3 本とする。

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、細骨材は普通細骨材として豊田市産山砂、粗骨材は EFG と普通粗骨材として豊田市産山砂利を使用する。本研究で用いる EFG は徐冷スラグである。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。

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)	産地又は回収元
EFG	6.55	0.85	3.74	株式会社星野産商
砂利	6.83	1.22	2.60	豊田市
砂	2.80	1.58	2.55	豊田市

*1 名古屋工業大学 社会工学科 (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 准教授 博 (工) (正会員)

*3 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (学生会員)

写真－1 に EFG 及び普通粗骨材を示す。砕石である EFG の表面はガラス質であって、凹凸が見られる。同様に砕石である普通粗骨材と比較して、密度が高く、吸水率が小さい。

2.3 調合

表－2 にコンクリートの調合を、表－3 にフレッシュコンクリートの性状を示す。水セメント比 50%，単位水量 170kg/m^3 ，細骨材率を 48.0%とし，普通粗骨材と置換した EFG の割合（以下，EFG 混合率とする）の違いによる加熱後の力学的特性の変化を段階的に把握するため，EFG 混合率は 0%，50%，100%の 3 条件とする。コンクリートのフレッシュ性状は目標スランプ値を $18.0\pm 2.5\text{cm}$ ，目標空気量 $4.5\pm 1.0\%$ とする。しかし，EFG を使用する場合は，コンクリートのワーカビリティや耐凍害性を確保するために，空気量は 1%程度大きくすることが推奨されている⁹⁾。そのため，EFG を混合する調合では目標空気量を $5.5\pm 1.0\%$ とする。

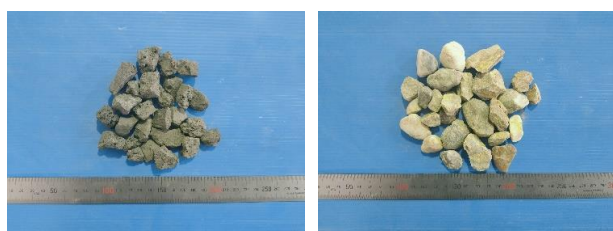
2.4 加熱条件

表－4 に実験条件を示す。原田⁴⁾によれば，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。そのため，本実験では加熱温度の上限を 600°C とし，加熱温度は常温及び 100°C ごと $100\sim 600^\circ\text{C}$ とする。

3. 実験内容

3.1 加熱方法

図－1 に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⁵⁾より，供試体の内外温度差及び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し，加熱時間の差による影響を考慮し昇温速度は 100°C/h とし，予備加熱を 60°C で



写真－1 使用した粗骨材 (左:EFG, 右:普通粗骨材)

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。

3.2 力学的特性の測定

加熱前後で供試体の寸法及び質量を測定し，単位容積質量を求める。本研究では，供試体の直径は加熱後の供試体の上下端面の直交する 2 方向について測定し，その平均値から供試体の底面積を算出する。また供試体の高さは上面の直径を 4 等分する 3 点を測定し，その平均値を供試体の高さとする。底面積と高さの積を供試体の体積と定義する。

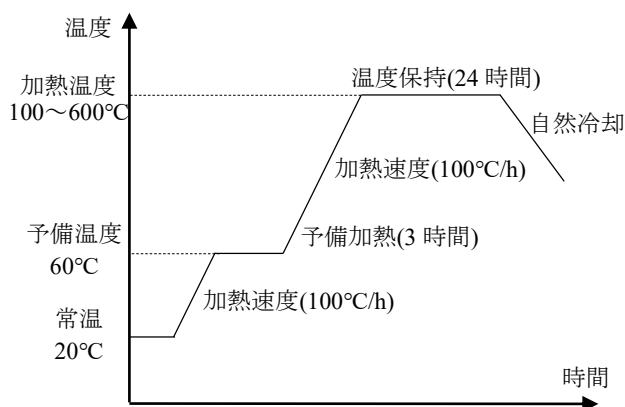
アムスラー型万能圧縮試験機を用いて，コンプレッソメータを取り付けた供試体を JIS A 1108:2018 に基づき载荷し，荷重と変位を測定して，これらにより圧縮強度と

表－3 フレッシュコンクリートの性状

EFG 混合率(%)	スランプ(cm)	空気量(%)
0	20.4	5.2
50	19.1	5.8
100	18.0	5.7

表－4 実験条件

項目	摘要	水準数
加熱温度 ($^\circ\text{C}$)	20(常温), 100, 200, 300,400,500,600	7
EFG 混合率 (%)	0,50,100	3



図－1 加熱方法の概要

表－2 コンクリートの調合

EFG 混合率 (%)	水セメント (W/C) (%)	細骨材率 (s/a) (%)	単位質量(kg/m^3)					高性能 AE 減水剤 ($\times\text{C}\%$)
			水 (W)	セメント (C)	普通細骨材 (S)	普通粗骨材 (G)	EFG	
0	50	48.0	170	340	829	915	-	0.75
50						458	658	
100						-	1316	

弾性係数を算出する。

EFG 混合率の違いによる単位容積質量、圧縮強度及び弾性係数の変化について比較する。

各加熱温度における単位容積質量、圧縮強度、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。単位容積質量残存比、圧縮強度残存比、弾性係数残存比により、コンクリートの力学的特性について高温加熱による変化のみを比較する。

3.3 加熱後供試体の外観及び破断面の観察

各加熱温度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変化を把握する。

圧縮試験を行った供試体の破断面を観察し、加熱温度による供試体の破断面を比較し、変化の要因を調べる。

4. 実験結果

4.1 加熱後供試体の状態

高温加熱後の供試体の外観を表-5 に示し、供試体のひび割れを赤線で示す。

300℃まではいずれの供試体においてもひび割れは生じない。400℃において EFG 混合率 50%の供試体 3 本の内の 1 本に微小なひび割れが生じるが他の供試体には生じなかった。500℃以降では EFG を用いたコンクリートにひび割れが生じ、600℃では 500℃と比較して大きなひび割れが生じる。また表-5 より、EFG 混合率が高くなるほどひび割れが大きくなる。

一方、EFG を用いないコンクリートでは 600℃においてもひび割れは生じない。

EFG を用いたコンクリートのみにひび割れが生じる原因を明らかにするため、供試体と同じ加熱方法で加熱した EFG の X 線回折を行った。常温と 100～600℃の 100℃ごとの各加熱温度でのチャート図を図-2 に示し、表-6 に徐冷スラグの加熱後の組成概算値を示す。

図-2 から、加熱温度が 400℃以降において 42°(2θ)と 62°(2θ)付近で、Wustite のピークが小さくなっている。また 400℃以降において 36°(2θ)と 63°(2θ)付近において、Magnetite のピークが生じている。Ducman ら⁶⁾によれば、

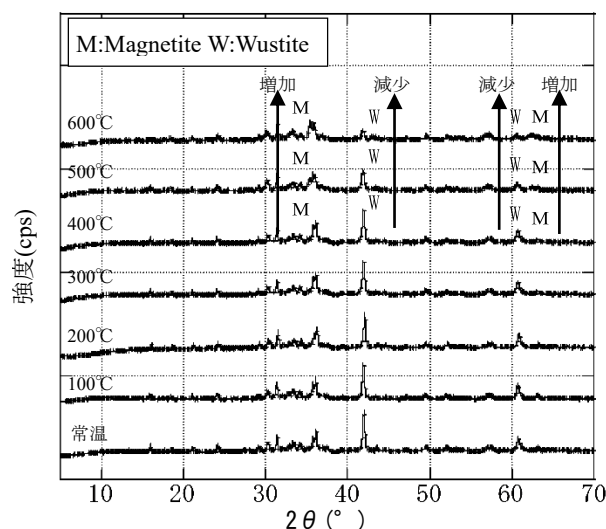


図-2 X 線回折チャート図

表-5 高温加熱後の供試体の外観

EFG 混合率(%)	加熱温度(℃)			
	300	400	500	600
0				
50				
100				

EFGに含まれる Wustite が加熱によって Magnetite に変化したと考える。また、表－6 から Wustite は未焼成から 600℃にかけて、42%から 13%に減少し、Magnetite は 400℃において発生し 600℃にかけて、9%から 26%に増加している。

Ducman ら⁹⁾によれば、加熱によって Wustite から Magnetite への組成変化が生じる際には体積膨張を伴う。これにより、加熱で Wustite が Magnetite に組成変化し、EFG が膨張したため、EFG を用いたコンクリートにひび割れが生じると考える。

なお、Wustite と Magnetite の熱膨張係数は、それぞれ 1.402×10^{-5} と 1.041×10^{-5} であり⁷⁾、Magnetite の方が小さい。このため、EFG を用いたコンクリートのひび割れは熱膨張係数の変化によるものではないと考える。

4.2 単位容積質量

単位容積質量と加熱温度の関係を図－3 に、単位容積質量残存比と加熱温度の関係を図－4 に示す。

図－3 より、常温時において単位容積質量は、EFG 混合率が高いほど高い。これは、EFG が普通粗骨材に比べ密度が高いためである。また、いずれの加熱温度においても EFG 混合率が高いほど、単位容積質量は高い。

シュナイダー⁸⁾によれば 100℃付近では自由水が蒸発することで、30～300℃では硬化セメントペーストの脱水作用が生じることで質量が低下する。また 180℃で硬化セメントペーストの脱水速度が最大となる。そのため、

図－4 において、単位容積質量は 200℃まで大きく低下するが、300℃以降では低下が小さい。

また、EFG を用いたコンクリートは、500℃以降において EFG を用いないコンクリートと比較して単位容積質量残存比が低下する。ここで、400℃及び 500℃の加熱による供試体の質量低下量の平均値は、EFG 混合率 0%でそれぞれ 313g, 324g, EFG 混合率 50%で 307g, 316g, EFG 混合率 100%で 307g, 325g であり、EFG 混合率の変化が質量低下量の変化に及ぼす影響は小さい。一方、400℃及び 500℃の加熱による供試体の体積膨張率の平均値は、EFG 混合率 0%でそれぞれ 99.9%, 100.0%, EFG 混合率 50%で 100.2%, 102.6%, EFG 混合率 100%で 100.4%, 103.4%となり、EFG を用いたコンクリートのみ 500℃において体積膨張が生じる。これにより、EFG を用いたコンクリートにおいて 500℃以降で単位容積質量残存比が低下するのは供試体の質量の低下によるのではなく、体積の増加によると言える。この体積の増加は前述の通り、EFG の膨張によるものと考えられる。

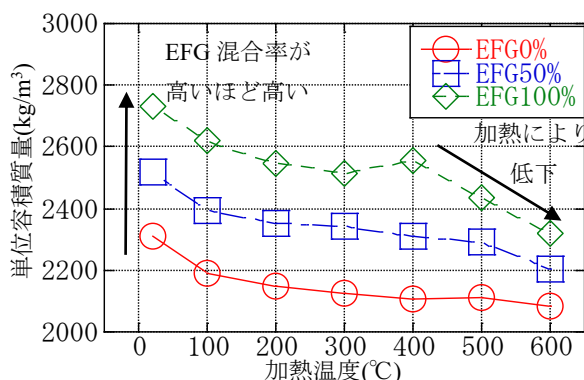
4.3 圧縮強度

圧縮強度と加熱温度の関係を図－5 に、圧縮強度残存比と加熱温度の関係を図－6 に示す。

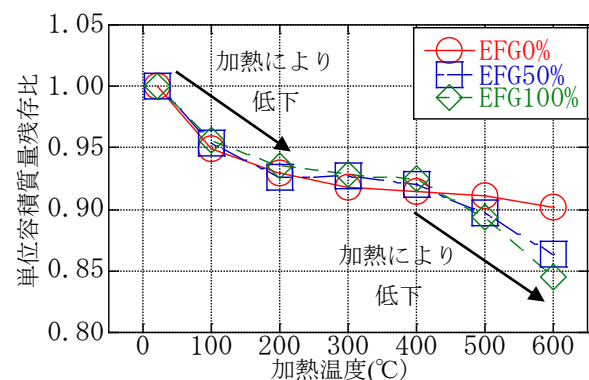
図－5 より、常温及び 100℃における圧縮強度は EFG 混合率が高いほど高い。また、200℃において圧縮強度は EFG 混合率の違いによらずほぼ等しい。400℃までは、EFG を用いたコンクリートは EFG を用いないコンクリ

表－6 徐冷スラグ焼成後組成概算値(wt%)

加熱温度 (℃)	Wustite (FeO)	Gehlenite (Ca ₂ (Al ₂ SiO ₇))	Magnesium-Iron- Aluminum-Oxid (MgFeAlO ₄)	Kirschsteinite (MgFeAlO ₄)	Magnetite (Fe ₃ O ₄)
未焼成	42	20	20	18	0
100	41	19	23	17	0
200	40	22	23	15	0
300	39	21	24	16	0
400	30	19	25	17	9
500	27	20	23	14	16
600	13	24	20	17	26



図－3 単位容積質量と加熱温度の関係



図－4 単位容積質量残存比と加熱温度の関係

ートと比較して圧縮強度が高い。Beaucour ら⁹⁾によれば、EFG の表面はモルタルとの接着がよく、EFG とモルタル界面の接着力が強くなり、強度が高くなったと考える。

また、500℃以降において EFG を用いたコンクリートは、表-5 に示す通り供試体にひび割れが生じるため、圧縮強度が、常温時の 2 割程度まで低下する。

図-6 より、EFG を用いたコンクリートの圧縮強度残存比は常温時から 100℃にかけて低下する。松戸ら¹⁰⁾によれば、100～200℃においては、この強度低下が生じる一方で、遊離水の蒸発により発生した高温蒸気がコンクリート中の未水和セメント粒子の水和を促進し、かなりの強度発現に寄与する。そのため、200℃において圧縮強度残存比は、いずれの EFG 混合率においても 100℃における圧縮強度残存比と比較して増加する。

400℃以降において、EFG を用いたコンクリートの圧縮強度残存比は、EFG を用いないコンクリートと比較して低下する。表-6 から、400℃以降において Wustite が Magnetite に組成変化し、EFG が膨張することにより供試体にひび割れが生じるためと考える。

4.4 弾性係数

600℃において、供試体のひび割れによる体積の膨張が著しいため、コンプレッソメータを取り付けることができない。そこで、本研究では 500℃までの弾性係数を測定する。弾性係数と加熱温度の関係を図-7 に、弾性係数残存比と加熱温度の関係を図-8 に示す。

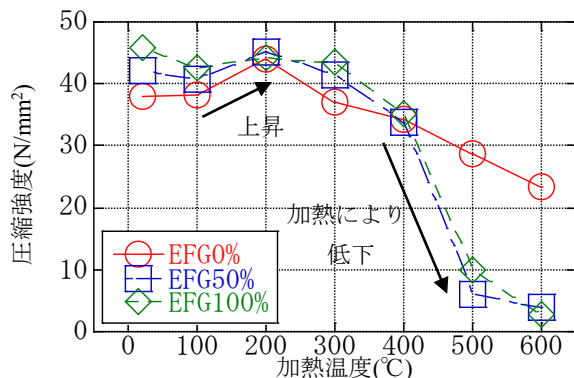


図-5 圧縮強度と加熱温度の関係

図-7 より、常温時において弾性係数は、EFG 混合率が高いほど高い。これは EFG 混合率が高いほど単位容積質量が高いためである。また、200℃までは EFG を用いたコンクリートの方が弾性係数は大きい、300℃以降では EFG を用いたコンクリートの方が小さくなる。

500℃において EFG を用いたコンクリートは弾性係数が著しく小さい。加熱により供試体にひび割れが生じるためであると考えられる。

図-8 より、EFG を用いたコンクリートの弾性係数残存比は、EFG を用いないコンクリートと比較して加熱による低下が大きい。

4.5 破断面の観察

表-7 に加熱後供試体の破断面を示す。破断面の骨材破壊と界面破壊の代表例を赤丸で示す。圧縮試験後の供試体の破断面を観察すると、EFG を用いないコンクリートの破断面では、粗骨材の破壊はほとんど生じず、粗骨材とモルタルの接着界面で破壊されている。

一方、EFG を用いたコンクリートの破断面では、EFG が破壊されていることがわかる。Beaucour ら⁹⁾によれば、EFG の表面はモルタルとの相性がよく接着力が高いため、EFG とモルタルの界面で破壊されず EFG が破壊されたと考える。そのため、加熱温度によらず圧縮強度は、骨材強度の影響を受けると考える。これにより、400℃までは EFG を用いたコンクリートの方が EFG を用いないコンクリートよりも、圧縮強度が高くなると考える。

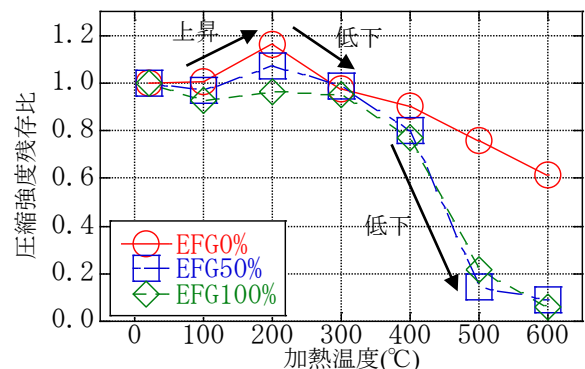


図-6 圧縮強度残存比と加熱温度の関係

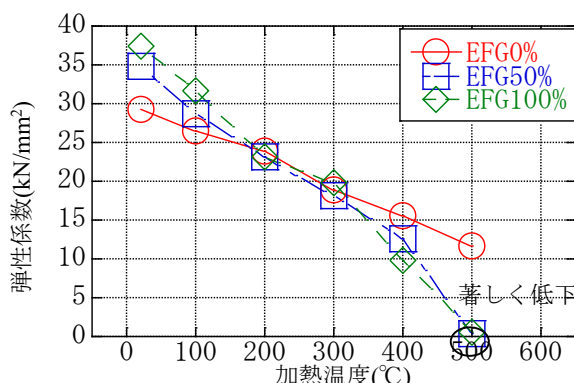


図-7 弾性係数と加熱温度の関係

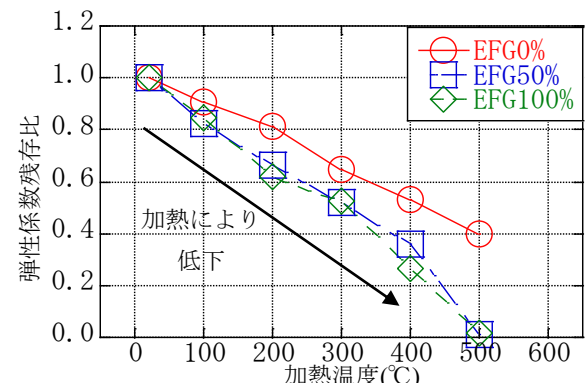
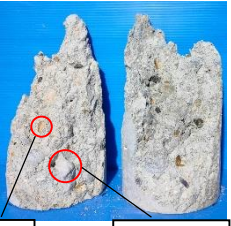
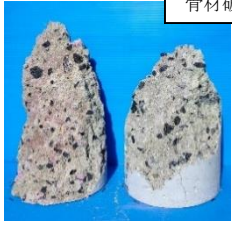
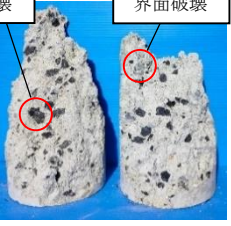


図-8 弾性係数残存比と加熱温度の関係

表－7 加熱後供試体の破断面

		加熱温度(℃)			
		常温	200	400	500
EFG 混合率 (%)	0				
	100				

5. まとめ

本研究の測定の範囲において以下のことがわかった。

- 1) 500℃以降では EFG を用いたコンクリートにひび割れが生じ、600℃では 500℃と比較して大きなひび割れが生じる。一方、EFG を用いないコンクリートでは 600℃においてもひび割れは生じない。
- 2) 加熱により Wustite が Magnetite に組成変化したことにより EFG が膨張し、EFG を用いたコンクリートにひび割れが生じる。
- 3) 常温時において単位容積質量は、EFG 混合率が高いほど高い。500℃以降では、EFG を用いたコンクリートではひび割れが生じ、供試体の体積が膨張するため単位容積質量残存比が低下する。
- 4) 400℃までは、EFG を用いたコンクリートは EFG を用いないコンクリートと比較して圧縮強度が高い。
- 5) 400℃以降において、EFG を用いたコンクリートの圧縮強度残存比は、ひび割れが生じるため、EFG を用いないコンクリートと比較して低下する。
- 6) EFG を用いたコンクリートの弾性係数残存比は、EFG を用いないコンクリートと比較して加熱による低下が大きい。
- 7) EFG 骨材の表面はモルタルとの相性がよく接着力が高いため、加熱温度によらず圧縮強度は、骨材強度の影響を受ける。

謝辞 本研究の一部は、公益財団法人鉄鋼環境基金 2020 年度研究助成金の助成・支援を受けたものです。株式会社竹本油脂は混和剤のご提供とコンクリートの調合についてご協力をいただきました。株式会社星野産商は EFG をご提供いただきました。ここに、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) 日本建築学会：電気炉酸化スラグ細骨材を用いるコンクリートの設計施工指針（案）・同解説，2005.4
- 3) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック 2017，日本建築学会，2017.4
- 4) 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，No.56，pp.1-7，1957.6
- 5) 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
- 6) Ducman, V., Mladenovic, A. : The potential use of steel slag in refractory concrete, MATERIALS CHARACTERIZATION, Vol.62, No.1, pp.716-723, 2011.4
- 7) 小野田守，佐々木晃：鉄及び酸化鉄の諸物性値，東北大学選鉱製錬研究所彙報，Vol.24，No.1，p.104，1969.1
- 8) U. シュナイダー：コンクリートの熱的性質，技報堂，1983.1
- 9) Beaucour, A.-L., Pliya, P., Faleschini, F., Njinwoua, R., Pellegrino, C., Noumowe, A. : Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate, Construction and Building Materials, Vol.256, 119385, 2020.9
- 10) 松戸正士，西田浩和，大塚貴弘，平島岳夫，安部武雄：高温加熱時における高強度コンクリートの力学的特性について，日本建築学会構造系論文集，第 73 巻，第 624 号，pp.341-347，2008.2