論文 細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

横井 奨*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3

要旨:近年,電気炉酸化スラグはコンクリート細骨材としての利用促進が期待されている。しかし,電気炉酸化スラグ細骨材(以下,EFS とする)を用いたコンクリートの高温下における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 EFS 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,弾性係数の測定と,コンクリートの破断面の観察を行い,EFS を用いたコンクリートの高温加熱後における力学的特性を確認した。これにより,普通コンクリートと比較して加熱による圧縮強度の上昇や低下が顕著に起こることを明らかにした。

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

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。「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 を含む還元スラグと分離して取り出すことが困難であ ったため、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、電気炉酸化スラグ細骨材(以下、EFS と する)として JIS A 5011-4 に規定された¹⁾」。

EFS は近年不足してきている天然骨材の代替材として, またコスト削減を目的として今後さらなる需要が見込 まれる。電気炉酸化スラグは現在,「未利用のまま堆積 しているものも多く存在している¹⁾」ため,電気炉酸化 スラグのコンクリート骨材としての利用を促進するこ とは,環境負荷を低減する観点からも重要である。

EFS は普通コンクリートの細骨材の一部を置換して 利用される他に、コンクリートの密度を増加できるため、 放射線遮蔽用コンクリートや、重量コンクリートなどに 利用されるが、EFS を用いたコンクリートは普通コンク リートと比較して、使用実績が少なく、その性質につい ての知見が少ないのが現状である。

コンクリートは火災などによって加熱されることで 強度をはじめとする物性が変化する。放射線遮蔽コンク リートや、ごみ焼却施設のコンクリートなど、特に熱を 受ける可能性が高いコンクリートは高温加熱による物 性変化について考慮する必要がある。高温加熱によるコ ンクリートの物性変化については様々な研究がなされ ている²⁾。しかし、高温下における EFS を用いたコンク リートの力学的特性に関する知見は少なく、EFS を用い たコンクリートの高温加熱後の力学的特性を把握する ことは電気炉酸化スラグのコンクリート骨材としての

*1 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科 (学生会員)
*2 名古屋工業大学大学院 助教 博(工)(正会員)
*3 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)

利用を促進するために重要である。

そこで, EFS を用いたコンクリートの高温加熱前後の 単位容積質量, 圧縮強度, 弾性係数の測定と, コンクリ ートの破断面の観察を行い, 普通コンクリートとの差異 を明らかにすることにより, 高温加熱後における EFS を 用いたコンクリートの力学的特性を把握する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した骨材の品質を表-1 に示す。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と EFS, 粗骨材は豊田市産山砂利を使用する。混和剤として,高 性能 AE 減水剤にはポリカルボン酸コポリマー系を使用 し,空気量調整剤にはアルキルエーテル型陰イオン界面 活性剤系を使用する。

EFS には急冷スラグ細骨材と徐冷スラグ細骨材が存在 し、これらは共に天然砂と比較して密度が高く、「高温 急冷処理のため天然砂と異なり粘土、有機不純物、塩分 を含んでいない¹⁾」。急冷スラグ細骨材は**写真-1**のよう に球形をしていることにより、フレッシュコンクリート の流動性を高め、単位水量を減少させることができる。 徐冷スラグ細骨材は**写真-2**のように表面が角形であり、 より安価である。本研究では、単位水量を減少させるこ とができ、今後コンクリート骨材としてより利用される と考えられる急冷スラグ細骨材を EFS として使用し、そ の化学成分を表-2 に示す。

2.2 供試体

供試体は Φ100×200mm の円柱供試体とし, JIS A 1132: 2014 に従って作製する。打込み翌日に脱型,1週間後に 研磨を行う。また,4週間水中養生を行う。供試体数は, 各実験条件に対して3本とする。

2.3 コンクリートの配(調)合

コンクリートの配(調)合を表-3に示す。「EFSを 用いた硬化コンクリートは、砂と置換した EFS の割合 (以下,混合率とする)が容積比で30%までは,引張強 度やポアソン比などが普通コンクリートと同等である ため、特別な配慮を必要としない 1)」。そこで、混合率 30%までを本実験の対象とする。

EFS を混合させることにより生じるコンクリートの力 学的特性の変化を段階的に把握するため,水セメント比 及び細骨材率を固定し, 混合率を 0~30%まで 10%ずつ 増加させる。急冷スラグ細骨材はフレッシュコンクリー トの流動性を高めるため、混合率を増加させるにつれて 高性能 AE 減水剤の量を減少させる。

各配(調)合における,目標スランプ値を 18±2.5cm, 目標空気量を4.5±1.0%とし、フレッシュコンクリートの スランプ値と空気量を表-4に示す。

2.4 加熱条件

「一般にコンクリートは 500℃以上に加熱された場合, 構造材料としての利用は困難となるが、500℃以内で加 熱された場合は月日の経過とともに強度と弾性の自然 回復が著しい³⁾」とされている。よって、加熱後に強度 回復を見込めず、構造材料としての利用が困難となる加 熱温度 600℃までを本実験の対象とし、加熱温度の条件 は常温 (20℃) 及び 100℃ごと 100, 200, 300, 400, 500, 600℃までの7水準とする。

加熱の概要を図-1に示す。既往の研究 4より,加熱 はプログラム調整器付き電気炉を使用し,加熱時の供試 体は加熱中に水分逸脱を認めるアンシール状態とし、無 載荷の状態にて行う。また、供試体の内外温度差を小さ くし熱応力による影響を小さくするため、加熱速度は 100℃/h とし,予備加熱を 60℃で 3 時間行った後,加熱 温度まで加熱する。加熱温度到達後は供試体内部の温度 が均一となるよう24時間温度を保持する。

降温は自然冷却とし、炉内の温度が 50℃程度に下がる まで炉内に放置する。加熱開始から自然冷却終了まで, 加熱温度 100℃及び 200℃は 2 日, 300℃及び 400℃は 3 日,500℃及び600℃は4日を要する。圧縮試験は自然冷 却後から24時間以内に常温下で行う。



写真-1 急冷スラグ細骨材 写真-2 徐冷スラグ細骨材



表-1 骨材の品質

骨材の 種類	産地 または 提供元	表乾密度 (kg/l)	粗粒率	吸水率 (%)
山砂	豊田市	2.55	2.80	1.58
山砂利	豊田市	2.60	6.84	1.22
EFS	株式会社 星野産商	3.54	3.33	0.33

表-2 EFS の化学成分

組成式	FeO	CaO	SiO ₂	MgO
割合 (%)	29.2	22.9	18.0	5.2

表-4 スランプ値と空気量

混合率(%)	スランプ値(cm)	空気量 (%)					
0	18.1	4.9					
10	18.8	4.9					
20	18.0	4.5					
30	18.4	4.5					

表-3 コンクリートの配(調)合

混合率 (%)			単位質量 (kg/m ³)				高性能	空気量	
	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	水		細骨材			AE 減水剤 調整剤	
				セメント	山砂	EFS	粗骨材	(×c%)	(×c%)
0	55			816	-		0.60		
10		16.0	1.65	200	734	113	075	0.50	0.001
20		46.0	165	65 300	653	227	975	0.45	0.001
30					571	340		0.40	

3. 実験方法

3.1 力学的特性の測定

加熱前後で供試体の直径,高さの寸法と質量を測定し, 単位容積質量を求める。常温時の単位容積質量を W6,加 熱後の単位容積質量を W1 としたとき,単位容積質量残 存比 W4 は式(1)で示される。また,単位容積質量残存比 と加熱温度の関係を求め,混合率ごとに比較する。

 $W_r = W_1/W_0$ (1)アムスラー型万能試験機を用いてJISA1108:2016に基づき圧縮試験を行い,圧縮強度と弾性係数を測定する。コンプレッソメータを取り付けた供試体をロードセルの上に置き、ロードセルとコンプレッソメータをデータロガーに接続することでコンプレッソメータの変位とロードセルに掛かる荷重を測定し、供試体中央のひずみと圧縮強度を算出する。載荷速度は毎秒 0.6±0.4N/mm²とする。また、コンクリートの破断面を観察するために、供試体が破壊されるまで載荷する。

常温時の圧縮強度を *G*₀,加熱後の圧縮強度を *G*₁としたとき,圧縮強度残存比 *G*は式(2)で示される。

$$C_{\rm r} = C_1 / C_0 \tag{2}$$

また,常温時の弾性係数を Eo,加熱後の弾性係数を E1 としたとき,弾性係数残存比 Erは式(3)で示される。

 $E_{\rm r} = E_1 / E_0 \tag{3}$

そして, 圧縮強度残存比と加熱温度の関係と, 弾性係 数残存比と加熱温度の関係をそれぞれ求め, 混合率ごと に比較する。

3.2 破断面の観察

普通コンクリート(混合率0%のコンクリート)とEFS を用いたコンクリートで圧縮強度に異なる傾向が確認 された加熱温度において,普通コンクリートと混合率 30%のコンクリートの破断面の観察を行う。観察には白 色共焦点顕微鏡を使用し,供試体の破断面の山砂とセメ ントペーストの界面及びEFS とセメントペーストの界 面を比較し,圧縮強度に異なる傾向が確認された要因を 検討する。

4. 測定結果と考察

4.1 単位容積質量について

単位容積質量と加熱温度の関係を図-2 に、単位容積 質量残存比と加熱温度の関係を図-3 に示す。

図-2より, EFS を用いたコンクリートと普通コンク リートの単位容積質量は同様に,200℃までは大きく低 下し,300~400℃で一定となり,400~600℃で再び低下 が起こる。これは,既往の研究⁵の普通コンクリートに おいても同様の結果となっている。また,EFS を用いた コンクリートは骨材の密度が高いため,いずれの加熱温 度でも,普通コンクリートより高い単位容積質量となる。 図-3より,200℃までは単位容積質量残存比が大きく 低下している。これは、「ペースト内の自由水及びゲル 水の脱水による^の」。

400~600℃にかけて再び単位容積質量が低下する。これは、「450~550℃の範囲でポルトランダイトの分解と CSH 相の分解により、水の遊離を伴いながらβ-C₂S が生成されることや、化学吸着による水の遊離が起こること^の」による。

また,普通コンクリートと EFS を用いたコンクリート の単位容積質量残存比は各加熱温度において,同じ傾向 を示すが,混合率が高いほど低下しにくい。これは,EFS の表面がガラス質であり保水性が低いことと,EFS は山 砂と比較して吸水率が低いことにより,供試体内に存在 する水分が少ないためと考える。

よって, EFS を用いたコンクリートは普通コンクリー トより,加熱による単位容積質量の低下が小さい。



4.2 圧縮強度について

圧縮強度と加熱温度の関係を図-4 に、圧縮強度残存 比と加熱温度の関係を図-5 に示す。

図-4 より, 100℃で EFS を用いたコンクリートは強 度低下し, 普通コンクリートはわずかに上昇している。 また, どちらも 200℃で強度上昇し, 300℃以降で再び強 度低下が起こる。これは, 既往の研究 ^{3),5)}の普通コンクリ ートにおいても概ね同様の結果となっている。

常温時は EFS を用いたコンクリートの方が普通コン クリートよりも圧縮強度が高くなる。一方,300℃では普 通コンクリートの方が EFS を用いたコンクリートより も圧縮強度が高くなる。このことから,EFS を用いたコ ンクリートは常温時で普通コンクリートの圧縮強度を 上回っていたとしても,加熱後に下回る場合がある。

図-5より,100℃において混合率が高いほど強度低下 が起こる。「複合材料であるコンクリートが加熱される と、骨材は膨張するが、セメント水和物は100℃周辺か ら収縮することにより、骨材とセメント水和物の不均質 さから、自己ひずみ応力が発生し強度低下が起こる。ま た、200℃までは供試体内で脱水が起こり、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、強度発現に寄与する^{5,7),8)}」。ま た、「EFSを用いたコンクリートの線膨張係数は、普通 コンクリートよりも若干大きい¹⁾」。

よって、100℃において各供試体は水和反応が促進さ れて強度発現が起こる。しかし、混合率が高いほど、骨 材の膨張による影響が大きくなり、強度低下が起こると 考える。

また、200℃において混合率が高いほど強度上昇が起こる。「EFS を用いたコンクリートは混合率が高い場合、 初期の強度発現が若干遅れる傾向にあり¹⁾」, EFS を用いたコンクリートは普通コンクリートと比較して、多くの未水和セメント粒子が存在すると考える。「脱水速度の最大値は180℃周辺で起こる⁹」ため、200℃では100℃よりも脱水により発生した高温蒸気によって未水和セメント粒子の水和反応が促進され、圧縮強度の上昇が起こると考える。

よって、200℃において骨材の膨張による影響と比較 し、水和反応による影響が大きいために強度上昇が起こ ると考える。

300°C以降は加熱温度の上昇に伴い,強度低下が起こ る。600°Cでは常温時の4~5割程度の強度にまで低下し, 混合率が高いほど強度低下は大きくなる。600°Cにおい て大きく強度低下が起こっていることは「450~550°Cの 範囲におけるポルトランダイトの分解と骨材との拘束 力の低下による⁹」。

よって, EFS を用いたコンクリートは 100℃及び 300℃

以上の加熱で強度低下,200℃の加熱で強度上昇が起こ り,強度変化は混合率が高いほど顕著である。



4.3 弾性係数について

弾性係数と加熱温度の関係を図-6 に,弾性係数残存 比と加熱温度の関係を図-7 に示す。

図-6より, EFS を用いたコンクリートと普通コンク リートの弾性係数は同様に,加熱温度の上昇とともに低 下し,600℃では常温時の1割程度まで低下する。これ は,既往の研究^{3),5)}の普通コンクリートにおいても概ね 同様の結果となっている。

図-7より,300~500℃の範囲において混合率が高い ほど弾性係数の低下が起きている。ここで,混合率30% のコンクリートと普通コンクリートの応力-ひずみ曲線 をそれぞれ図-8,9に示す。曲線上の二点を結んだ線分 が常に曲線の下側にあるような曲線を「上に凸」,上側 にあるような曲線を「下に凸」として,図-8,9を比較 すると,どちらも常温では常に「上に凸」な曲線である ことに対し,600℃では,ひずみが小さいときは「下に凸」 な曲線であり,ひずみが大きくなるにつれて徐々に「上 に凸」な曲線に変化している。ひずみが小さいときに「下 に凸」となるのは,加熱によって骨材の膨張やセメント ペーストの収縮が起こり,「微細亀裂が生じた影響¹⁰」 であると考える。

また,混合率 30%のコンクリートは 500℃でひずみが 小さいときにも「下に凸」となっている。これは, EFS の 方が山砂よりも加熱によって膨張しやすいため,普通コ ンクリートと比較して EFS を用いたコンクリートは骨 材の膨張による影響が大きく, 微細亀裂が多く存在して いることが影響していると考えられる。よって,弾性係 数は加熱温度が高いほど低下し, 300℃以上の加熱では EFS を用いたコンクリートの方が,骨材の膨張による影 響が大きいために弾性係数の低下が大きい。

4.4 破断面の観察について

混合率が高いほど強度上昇が起こる 200℃,強度上昇 が起こる以前の加熱温度である常温及び 100℃,本測定 の範囲内で最も高い加熱温度である 600℃において破断 面の観察を行う。普通コンクリートの破断面をそれぞれ 写真-3~6 に,混合率 30%のコンクリートの破断面を写 真-7~10 に示す。

写真-3~6において、山砂とセメントペーストの界面 に注目すると、加熱温度の違いによる山砂の表面形状の 変化は確認できない。写真-7、8において、EFSとセメ ントペーストの界面に注目すると、EFSは球形であり表 面に光源からの反射による光沢がある。しかし、写真-9、10において EFS の表面の光沢が失われ、破断面に球 形の EFS が露出していない。これらより、EFSを用いた コンクリートは 200℃の加熱において、EFS の表層の融 点の低い成分が軟化し、セメントペーストと EFS の界面 を一体化して、強度が上昇すると考える。







-3 普通コンクリート 常温(20°C)



写真-4 普通コンクリート 加熱温度 100℃





写真-5 普通コンクリ - ト 加熱温度 200℃

写真-6 普通コンクリ 加熱温度 600℃



写真-7 混合率 30% 常温 (20℃)



写真-8 混合率 30% 加熱温度 100℃





写真-9 混合率 30% 加熱温度 200℃

写真-10 混合率 30% 加熱温度 600℃

- 3) 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 会論文集,第56号,pp.1-7,1957.6
- 4) 河辺伸二,岡田和寿,滝本憲太:再生粗骨材を用いた コンクリートの高温加熱後の力学的特性、コンク リート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.783-788,2007.7
- 5) 古村福次郎:高温度におけるコンクリートの力学的 性質に関する研究(その2),日本建築学会論文報告 集,第173号,pp.17-24,1970.7
- 6) U.シュナイダー著,森永繁,山崎庸行,林章二訳:コン クリートの熱的性質,技報堂,1983.1
- 7) 安部武夫,古村福次郎, 戸祭邦之, 黒羽健嗣, 小久保勲: 高温度における高強度コンクリートの力学的特性 に関する基礎的研究,日本建築学会構造系論文集,第 515 号,pp.163-168,1999.1
- 8) 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
- 9) 一瀬賢一,長尾覚博,川口徹:高温加熱下における高 強度コンクリートの力学的性質に関する研究,コン クリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1105-1110,1999.6
- 10) 最知正芳,四戸英男:応力度-ひずみ度平均曲線によ るコンクリートのダメージ評価,コンクリート工学 論文報告集,第10卷,第2号,pp.73-82,1999.5

5. まとめ

- 本研究の範囲内において、以下のことが分かった。
- 1) EFS を用いたコンクリートは普通コンクリートよ り、加熱による単位容積質量の低下が小さい。
- 2) EFS を用いたコンクリートは 100℃及び 300℃以上 の加熱で強度低下,200℃の加熱で強度上昇が起こ り、強度変化は混合率が高いほど顕著である。
- 3) 弾性係数は加熱温度が高いほど低下し、100℃及び 300℃以上の加熱ではEFSを用いたコンクリートの 方が,骨材の膨張による影響が大きいために弾性係 数の低下が大きい。
- 4) EFSを用いたコンクリートは200℃の加熱において, EFS の表層の融点の低い成分が軟化し、セメントペ ーストと EFS の界面を一体化して, 強度が上昇す ると考える。

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 JP16K06569 の助成・ 支援を受けたものです。竹本油脂株式会社には混和剤の ご提供と EFS を用いたコンクリートの配(調)合につい てご協力を得ました。EFS は株式会社星野産商に、セメ ントは住友大阪セメント株式会社にご提供いただきま した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 日本建築学会:構造材料の耐火性ガイドブック,2017