論文 フライアッシュを混入した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

河辺 伸二*1·岡田 和寿*2·菊地 剛広*3·陳 海峰*4

要旨:フライアッシュを混入した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について実験を行い,以下の結果を得た。(1)フライアッシュを混入した普通粗骨材と再生粗骨材のコンクリートの単位容積質量や圧縮強度と弾性係数の力学的特性と加熱温度の関係を求め,粗骨材の差が少ないことがわかった。(2)フライアッシュの混入の有無で比較し,有無の差が少ないことがわかった。(3)高温加熱後のコンクリートの超音波伝播速度測定を行い,伝播速度は加熱温度が高くなるにつれて低下した。(4)高温加熱後再び4週間水中養生したコンクリートの圧縮強度と弾性係数の回復が見られた。

キーワード:再生粗骨材,フライアッシュ,高温加熱,圧縮強度,超音波伝播速度測定,伝播速度

1. はじめに

廃コンクリートの有効利用のため,再生粗骨材を使用したコンクリートが用いられている。筆者らは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について,コンクリートの水セメント比30%と50%,養生期間を4週間水中養生と8週間水中養生で高温加熱後のコンクリートの力学的特性を検討1)した。さらに,木材片が混入した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について,水セメント比50%,養生期間を4週間水中養生と8週間水中養生,13週間水中養生で,再生粗骨材製造の工程上入ってしまう大きさの木材片を0%から2%まで0.5%刻みで意図的に混入させ,高温加熱後のコンクリートの力学的特性を検討2)した。

また,近年,電力使用量の大幅な増加に伴い火力発電所から大量のフライアッシュが排出されており,フライアッシュをコンクリートに混入し有効利用を図っている。フライアッシュを混入したコンクリートの高温加熱後の圧縮強度や弾性係数は重要でありながら知見が少なく、さらにフライアッシュを混入した再生粗骨材を用いたコンクリートの高温加熱後の知見は皆無である。

そこで本研究では,再生粗骨材を用いたコンクリートにフライアッシュを混入した供試体を用い,単位容積質量や圧縮強度と弾性係数のコンクリートの力学的特性を検討した。また本研究では,コンクリートの高温加熱後の単位容積質量残存比,圧縮強度残存比,弾性係数残存比も検討した。さらにコンクリートが受けた温度を推定する一資料として超音波伝播速度測定装置を用い,伝播速度と加熱温度の関係から高温加熱後の力学的特性

を検討した。また,高温加熱後再び4週間水中養生した コンクリートの圧縮強度と弾性係数の回復を検討した。

2. 実験方法

2.1 実験条件

実験条件を表 - 1 に示す。養生期間は4週間水中養生,8週間水中養生,13週間水中養生の3水準,使用骨材は再生粗骨材と普通粗骨材の2水準,加熱温度は20 (常温,加熱無しのこと)と100,200,400,600 の5水準とした。また,13週間水中養生の高温加熱実験の後,供試体を養生槽に戻し4週間の水中養生後,圧縮試験を行い強度回復の検討をした。水セメント比は普通コンクリートを想定し50%とした。加熱温度は,600 までの200 毎と過去の実験から特異な結果が得られると思われる100 とした。フライアッシュは無の0%と,セメント置換率(内割)で30%の2水準とした。

なお,過去の実験データと比較をするため,過去の実験条件^{1,2)}と表-1の実験条件を統一した。

2.2 使用材料と調合

普通ポルトラントセメント,細骨材に大井川水系産川砂(表乾密度:2.58g/cm³),粗骨材に再生粗骨材(表乾密度:2.63g/cm³)と岡崎産砕石(表乾密度:2.68g/cm³)を使用した。骨材の品質を表-2に示す。混和剤は,ポリカルボン酸系高分子化合物を主成分とする高性能 AE減水剤を使用した。フライアッシュは,JIS A6201の種を使用した。各コンクリートの調合を表-3に示す。Nは普通コンクリート,RHG は再生コンクリート,FA30%は30%のフライアッシュを混入したことを示す。

^{*1} 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)

^{*2} 名古屋工業大学大学院 大学院生 工修 (正会員)

^{*3} 名古屋工業大学大学院 大学院生

^{*4} 名古屋工業大学 講師 博士(工学) (正会員)

表 - 1 実験条件

項目	摘要	水準数
養生期間	4週間水中、8週間水中、13週間水中	3
使用粗骨材	再生粗骨材、普通粗骨材	2
加熱温度	20 、100 、200 、400 、600	5
フライアッシュ	0%、30%	2

表 - 2 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾密度	粗粒率	吸水率
		(g/cm³)	(%)	(%)
S	大井川水系産川砂	2.58	2.72	2.08
G	岡崎産砕石	2.68	6.70	0.67
RHG	再生粗骨材	2.63	6.43	1.91

表 - 3 コンクリートの調合

	W	単位質量(kg/m³)					混和剤	
記号	/	W	С	FA	S	G	RHG	対セメ
	С	VV	C	ГА	0	5	KIG	ント(%)
N:		170	238	102	777	972		0.45
FA30%		170	236	102	///	972	•	0.45
RHG:	5	170	220	100	777		955	0.4
FA30%	0	170	238	102	///	ı	900	0.4
RHG:		170	340		796		980	0.75
FA0%		170	340	-	196	-	900	0.75

2.3 再生粗骨材

本実験で使用した再生粗骨材は偏心ローター式処理 装置により製造して JIS A5201 の再生粗骨材 H とした。 産出に関する情報を表 - 4 に,その写真を写真 - 1 に示 す。再生粗骨材のアルカリシリカ反応性については,塩 酸でセメント分除去後に化学法にて検査を実施し,無害 と判定した。

2.4 測定項目と測定方法

測定項目を表 - 5 に示す。単位容積質量変化,圧縮強度,弾性係数(ヤング係数)と超音波測定装置を用いてコンクリートの伝播速度の測定を行った。単位容積質量の測定は電子天秤で行った。供試体は, 100×200mm円柱供試体を用い,供試体本数は各実験条件に対して3本とした。

2.5 打設と養生

コンクリートの打設には,容量 100L 強制練ミキサを 使用した。打設翌日に脱型を行い,その後は各養生期間 20±3 の水中養生を行った。

表 - 4 再生粗骨材の産出に関する情報

記号	産地	原骨材 の種類	原骨材発生地	アルカリシリカ 反応性
RHG	不明	砂利	東京都千代田 区事務所ビル	無害

表 - 5 測定項目

測定時期	種類	測定方法	
加熱前後	単位容積質量変化	-	
	圧縮強度	JIS A 1108	
	弾性係数	JIS A 1149 を参考	
	超音波測定	-	

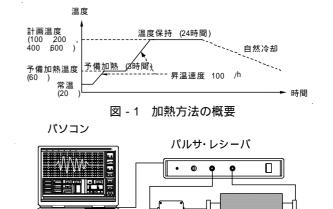


図 - 2 超音波伝播速度測定装置

供試体 送信探触子

受信探触子

2.6 加熱方法

プリアンプ

プログラム調節器付き電気炉を用いて加熱した。加熱時の供試体は加熱中に水分散逸を認めるアンシール状態とし,無載荷状態にて行った。加熱実験は養生条件に従い,4,8,13週間水中養生終了後に行った。供試体の内外温度差,熱応力による影響を小さくするため,既住の研究 ^{3,4)}を参考とし,予備加熱を 3 時間,60 で行った。昇温速度は 100 /h とした。計画温度到達後は供試体内部温度が均一となるように,24 時間温度保持した。加熱方法の概要を図 - 1 に示す。

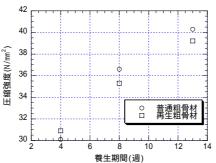
2.7 加熱後の処理

加熱後の降温は炉内のファンを作動させながら自然 冷却とし、炉内の雰囲気温度が常温になるまで供試体を 炉内に放置した。表 - 5 に示す測定は降温から 5~24 時 間後、常温下で行った。

2.8 超音波伝播速度の測定

超音波伝播速度測定装置を図-2 に示す。今回の実験で使用した超音波パルサ・レシーバの電圧は 10~600V,





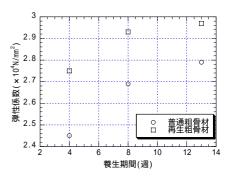


写真 - 1 再生粗骨材

図-3 圧縮強度と養生期間

図-4 弾性係数と養生期間

発信周波数は30kHz~10MHz,波数は1~31の範囲で変化させることがでる。また,超音波を受信する際にノイズを減少させ,より安定した波形を取得できるように,受信探触子と本体の間にプリアンプを使用した。本実験では,図-2のように発信探触子から供試体内部に超音波を発生させ,受信探触子で波を取得する二探触子透過法を用いた。探触子と供試体の接触面にグリセリンを塗布し,超音波の伝播性能を向上させた。

波形が安定するように電圧を 10V,50V,100V に変えて,周波数は50kHz,波数は1とした。

2.9 伝播速度の算出

探触子の内部には,波を発生させる振動子が存在する。その振動子を保護するための保護板があるため,探触子同士を直接接触させても波の立ち上がりには僅かな時間差 t_0 が生じる。この時間差は各周波数で異なり,超音波の伝播時間を求める際に,波の到達時間 t_1 から,この時間差 t_0 を引いたものが超音波の伝播時間となる。伝播速度は,供試体の長さから超音波の伝播時間を除した式1となる。

$$v = \frac{l}{t_1 - t_0} \tag{1}$$

v:伝播速度(m/s)

1:円柱供試体の長さ(m)

t₀:探触子による時間差(s)

t₁: 超音波の到達時間(s)

3. 実験結果と考察

3.1 常温時のコンクリートの力学的特性

養生期間 4 週間 , 8 週間 , 13 週間の常温時のフライアッシュを混入した普通粗骨材と再生粗骨材のコンクリートの圧縮強度を図 - 3 に,弾性係数を図 - 4 に示す。両者とも,養生期間が長くなるほど大きくなった。

3.2 外観観察

加熱温度 100 ,200 では表面が白色に変化し,一部の供試体に亀甲状のひび割れを確認した。加熱温度 400 では表面が薄い桃色に変化し,すべての供試体に幅が細いひび割れを少数確認した。加熱温度 600 では

表面が乳白色に変化し,すべての供試体において幅が太いひび割れを多数確認した。使用骨材の違いによる影響は,本実験の範囲では認められなかった。また,養生期間の違いによる影響は,本実験の範囲では上記の内容以外には認められなかった。

3.3 単位容積質量

(1)普通粗骨材と再生粗骨材

フライアッシュを混入した普通粗骨材と再生粗骨材のコンクリートの単位容積質量と加熱温度の関係を図-5に示す。加熱温度が高いものほど単位容積質量が減少している。また、単位容積質量残存比と加熱温度の関係を図-6に示す。単位容積質量残存比は、常温時の単位容積質量に対する各加熱後の単位容積質量の比を表したものである。加熱温度が高いものほど単位容積質量残存比も減少している。本実験では使用粗骨材の種類にかかわらず、加熱温度が高くなるとともに単位容積質量残存比が低下している。単位容積質量残存の傾きは、加熱温度が100から200において大きく、200から600の加熱温度では概ね一定の傾きを示している。

(2) フライアッシュ混入の有無

フライアッシュの混入の有無で比較した再生粗骨材のコンクリートの単位容積質量と加熱温度の関係を図-7に示す。同様にフライアッシュの混入の有無で比較した単位容積質量残存比と加熱温度の関係を図-8に示す。本実験においてフライアッシュの混入の有無による単位容積質量の違いは見られなかった。

3.4 圧縮強度

(1)普通粗骨材と再生粗骨材

フライアッシュを混入した普通粗骨材と再生粗骨材のコンクリートの圧縮強度と加熱温度の関係を図 - 9 に示す。圧縮強度は加熱温度 100 で低下した後,加熱温度 200 で上昇し,以降の加熱温度では再び低下した。これは過去の研究 1.2 と同じ傾向であった。各加熱温度において圧縮強度は,普通粗骨材のコンクリートが再生粗骨材のコンクリートより大きい値を示した。

圧縮強度残存比と加熱温度の関係を図 - 10 に示す。圧 縮強度残存比は,常温時の圧縮強度に対する各加熱後の

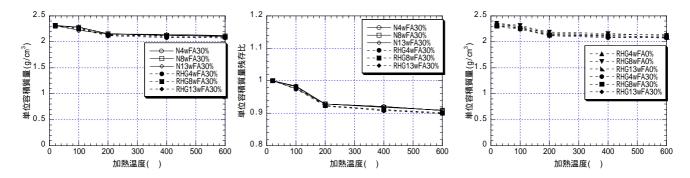
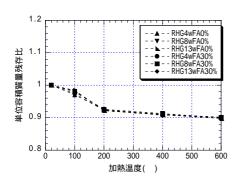
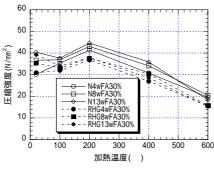


図 - 5 単位容積質量と加熱温度 (普通粗骨材と再生粗骨材)

図 - 6 単位容積質量残存比と加熱温度 (普通粗骨材と再生粗骨材)

図 - 7 単位容積質量と加熱温度 (FA0%と FA30%)





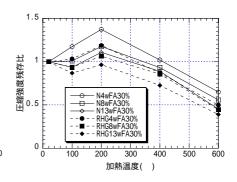


図 - 8 単位容積質量残存比と加熱温度 図 - 9 圧縮 強度と加熱温度 (FA0%と FA30%) (普通粗骨材と再生粗骨材)

図 - 10 圧縮強度残存比と加熱温度 (普通粗骨材と再生粗骨材)

圧縮強度の比である。

普通粗骨材と再生粗骨材のコンクリートの両者とも,200 の加熱温度において,養生期間が短い4週間水中養生の圧縮強度残存比が大きかった。13週間水中養生のフライアッシュを混入した再生粗骨材のコンクリートは,200 の加熱温度において圧縮強度残存比が小さかった。どのコンクリートも200 の加熱温度では圧縮強度残存比は増加し,400 ,600 において減少した。

(2)フライアッシュ混入の有無

フライアッシュの混入の有無で比較した再生粗骨材のコンクリートの単位容積質量と加熱温度の関係を図-11 に示す。どのコンクリートも圧縮強度は加熱温度100 において低下した後,加熱温度200 で上昇し,以降の加熱温度で再び低下した。フライアッシュを混入したコンクリートの圧縮強度は,フライアッシュを混入しないコンクリートの圧縮強度を下回る結果となった。

圧縮強度残存比と加熱温度の関係を図 - 12 に示す。圧縮強度残存比は,常温時圧縮強度に対する各加熱後の圧縮強度の比である。フライアッシュの有無に関わらず,どのコンクリートも 200 の加熱温度では圧縮強度残存比は増加し,400 ,600 において減少した。4 週間と8 週間の水中養生のフライアッシュを混入した再生粗骨材のコンクリートは,200 の加熱温度において圧縮強度残存比が大きかった。フライアッシュを混入したコン

クリートの圧縮強度残存比は,フライアッシュを混入しないコンクリートの圧縮強度残存比を上回った。

(3)養生期間

圧縮強度残存比は養生期間が短いものほど,高い圧縮 強度残存比を示す結果となった。加熱温度が 200 の場 合にその傾向は顕著であった。

3.5 弹性係数

(1)普通粗骨材と再生粗骨材

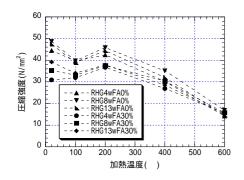
フライアッシュを混入した普通粗骨材と再生粗骨材のコンクリートの弾性係数と加熱温度の関係を図 - 13に示す。本実験では使用粗骨材種類にかかわらず,100の加熱温度までは一定で,加熱温度が高くなると弾性係数が低下した。

弾性係数残存比と加熱温度の関係を図 - 14 に示す。弾性係数残存比は,常温時の弾性係数に対する各加熱後の弾性係数の比である。本実験では,使用骨材種類にかかわらず,加熱温度が高くなるとともに,弾性係数残存比が低下している。

(2)フライアッシュ混入の有無

フライアッシュの混入の有無で比較した再生粗骨材のコンクリートの弾性係数と加熱温度の関係を図 - 15に示す。本実験ではフライアッシュ混入の有無にかかわらず,加熱温度が高くなると弾性係数が低下している。

弾性係数残存比と加熱温度の関係を図 - 16 に示す。弾



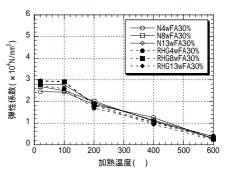
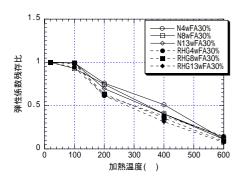
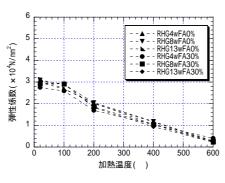


図 - 11 圧縮強度と加熱温度 (FA0%と FA30%)

図 - 12 圧縮強度残存比と加熱温度 (FA0%と FA30%)

図 - 13 弾性係数と加熱温度 (普通粗骨材と再生粗骨材)





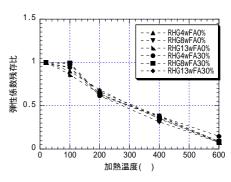


図 - 14 弾性係数残存比と加熱温度 (普通粗骨材と再生粗骨材)

図 - 15 弾性係数と加熱温度 (FA0%と FA30%)

図 - 16 弾性係数残存比と加熱温度 (FA0%と FA30%)

性係数残存比は,常温時の弾性係数に対する各加熱後の 弾性係数の比である。本実験では,フライアッシュ混入 の有無にかかわらず,加熱温度が高くなるとともに,弾 性係数残存比が低下している。

3.6 伝播速度

伝播速度と加熱温度の関係を図 - 17 に示す。加熱温度が高くなるにつれて伝播速度が低下している。超音波は物体を振動させることにより伝播していく。供試体内部の空隙が多くなり超音波が伝播しにくいため、伝播速度が低下したと考える。今回の試験結果では特に加熱温度100 ~ 200 において伝播速度の大きな低下が見られており、約30%低下した。これは、弾性係数と加熱温度の関係を示す図 - 13 と同様の低下傾向を示している。なお、400 の加熱温度でフライアッシュの混入なしの再生粗骨材のコンクリートの伝播速度が大きくなっている原因は不明で検討中である。

3.7 再水中養生後の圧縮強度と弾性係数

フライアッシュを混入した普通粗骨材と再生粗骨材のコンクリートを 13 週間水中養生後,各計画温度に高温加熱した後,再び4週間水中養生をした。13週間水中養生後に高温加熱したコンクリートと,高温加熱後再び4週間水中養生したコンクリート(図中で回復と示す)を比較した圧縮強度と加熱温度の関係を図-18に示す。高温加熱後再び4週間水中養生したコンクリートの圧縮

強度は 200 ~600 で上昇し,600 の加熱温度で 13 週間水中養生後に高温加熱したコンクリートの圧縮強度を上回り,圧縮強度の回復が見られた。

同様に、13週間水中養生後に高温加熱したコンクリートと、高温加熱後再び4週間水中養生したコンクリートの弾性係数と加熱温度の関係を図・19に示す。弾性係数はすべての加熱温度で、高温加熱後4週間水中養生を行ったコンクリートの弾性係数が、13週間水中養生後に高温加熱したコンクリートの弾性係数を上回り、弾性係数の回復が見られた。

3.8 相関式による考察

過去の研究^{1,2)}と同様に相関式を求める。13週間水中 養生したコンクリートの単位容積質量残存比と圧縮強 度残存比の関係を図 - 20 に,単位容積質量残存比と弾性 係数残存比の関係を図 - 21 に,弾性係数残存比と圧縮強 度残存比の関係を図 - 22 に示す。

本研究の範囲内において,加熱温度を区別せず,圧縮強度残存比を X,単位容積質量残存比を Y とすると,式(2)の関係を得た。

$$Y=0.10X+0.86$$
 (2)

同様に,本研究の範囲内において弾性係数残存比を X, 単位容積質量残存比を Y とすると,式(3)の関係を得た。

$$Y=0.10X+0.88$$
 (3)

同様に,本研究の範囲内において圧縮強度残存比をX,

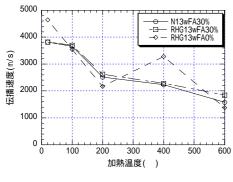


図 - 17 伝播速度と加熱温度

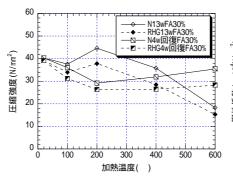


図 - 18 圧縮強度と加熱温度

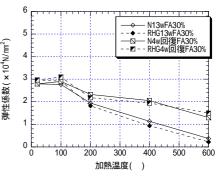


図 - 19 弾性係数と加熱温度

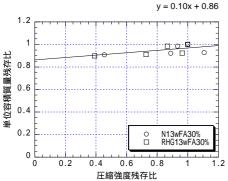


図 - 20 単位容積質量残存比と 圧縮強度残存比(13w)

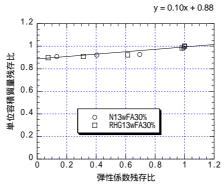


図 - 21 単位容積質量残存比と 弾性係数残存比(13w)

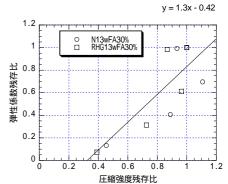


図 - 22 弾性係数残存比と 圧縮強度残存比(13w)

弾性係数残存比を Y とすると,式(4)の関係を得た。

$$Y = 1.3X - 0.42$$
 (4)

本研究の範囲内において,単位容積質量残存比と圧縮 強度残存比,単位容積質量残存比と弾性係数残存比のそれぞれの間に,相関の高い式を得ることが出来た。弾性 係数残存比と圧縮強度残存比の関係については,他の関 係よりも相関が低かった。

4. まとめ

- (1) フライアッシュを混入した普通粗骨材と再生粗骨材のコンクリートの単位容積質量や圧縮強度と弾性係数の力学的特性と加熱温度の関係を求め,粗骨材の差が少ないことがわかった。
- (2) フライアッシュの混入の有無で比較した再生粗骨材のコンクリートの単位容積質量,圧縮強度,弾性係数と加熱温度の関係を求め,有無の差が少ないことがわかった。
- (3) 高温加熱後のコンクリートの伝播速度は,加熱温度が高くなるにつれて低下した。
- (4) 高温加熱後再び 4 週間水中養生したコンクリートの圧縮強度と弾性係数の回復が見られた。

謝辞

研究の遂行に当たり,本学名誉教授川嶋紘一郎工学博士と,本学卒論生関戸重裕氏に謝辞を表します。

参考文献

- 1) 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報告集,29-1,pp.783-788,2007.7
- 2) 河辺伸二,岡田和寿,菊地剛広:木材片が混入した 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報告集, 30-1,pp.513-518,2008.7
- 3) 一瀬賢一: 高温加熱を受けた 100N/mm² 級高強度コンクリートの力学的性状, コンクリート工学年次論文報告集, 29-1, pp.97-102, 2007.7
- 4) 廣畑光生,河辺伸二,岡島達雄,賀屋善行:高温加 熱後の高強度コンクリートの力学的性質,コンクリ ート工学年次論文報告集,19-1,pp.625-630,1997.6
- 5) コンクリート工学ハンドブック,朝倉書店,1981.11