

# 論文 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

河辺 伸二\*1・岡田 和寿\*2・菊地 剛広\*3

**要旨**：再生粗骨材を使用したコンクリートの力学的安全性を評価するための基礎データとして、木材片が混入した再生粗骨材を使用したコンクリートの高温加熱後の力学的特性について、以下の項目を検討した。(1) 再生粗骨材に木材片が混入することを想定し、0 から 2.0%の 5 水準の木材片混入率で検討した。(2) 所要の空気量に、木材片が燃焼した後に出来る空隙を足した木材片混入率換算空気量を用いて検討した。実験の結果、以下のことが分かった。加熱温度が高いほど圧縮強度や弾性係数は大きく減少した。木材片混入率換算空気量が多いほど、圧縮強度や弾性係数は減少傾向にあるが、本研究の範囲内の木材片混入率では大きな減少は見られなかった。

**キーワード**：再生粗骨材, 木材片, 高温加熱, コンクリート, 圧縮強度, 弾性係数

## 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始めている。この際に、コンクリート片を加熱してすりもみとするのが一般的であるが、この方法はコストがかかるため、加熱を施さないすりもみ処理方法も考案されている。しかし、いずれの方法も再生粗骨材表面に付着している原コンクリートのモルタルを完全に除去することはできない。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」<sup>1)</sup>において、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力学的特性について検討を行った。

また、解体工事時に、プラスチックや木材などの現場での不純物が解体したコンクリートに多く混入する。不純物は再生骨材製造中にフィルターを通すことにより大半は除去可能であるが、コストの観点から完全に除去できず、少量の木材片が再生骨材中に混入するのが実状である。

そこで本研究では、再生粗骨材中に現場で混入する寸法と同等の木材片を混入し、木材片が混入した再生粗骨材を用いたコンクリートの力学的特性に関する実験を行い、単位容積質量、圧縮強度、弾性係数を検討する。さらに供試体を電気炉にて高温加熱処理を施し、コンクリート中に混入した木材片が炭化した後に出来る空隙が力学的特性に及ぼす影響を、加熱後の単位容積質量残存比、圧縮強度残存比、弾性係数残存比により検討する。

## 2. 実験概要

### 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、木材混入率は0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0%の5水準、加熱温度は20℃(常温, 加熱無)と100, 200, 400, 600℃の5水準とした。4週間と8週間の測定は混入率0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%の5水準の20℃(常温, 加熱無)のみ行い、高温加熱は13週間強度の測定を主とした。水セメント比は普通コンクリートを想定し50%とした。加熱温度は火災を想定し、加熱温度600℃までの200℃毎と過去の実験から異なる結果が得られると思われる100℃とした。

また、木材の燃焼性は常温から100℃で、水分が蒸発し乾燥状態となり、100℃から260℃で木材が熱分解し、可燃性ガスと不燃性ガスを発生させ褐色から黒色に変色する。260℃で引火温度となり、420℃から460℃で発火温度に至る。

今回の実験では、コンクリート中に木材片を混入し高温加熱をかけることにより木材片が炭化するため、炭化の体積相当がコンクリート内の空隙になると仮定した。この場合の空隙を、コンクリート調合の空気量4.0%に加えることで、木材片混入率換算空気量として取り扱うこととした。

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<sup>1, 2)</sup>と表-1の実験条件との統一に努めた。

### 2.2 使用材料と調合

普通ポルトランドセメント、細骨材に大井川水系産川砂(表乾密度: 2.58g/cm<sup>3</sup>)、粗骨材に再生粗骨材(表乾密度: 2.63g/cm<sup>3</sup>)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。

写真-1に使用する木材片を示す。木材片は、不純物

\*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

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
木材混入率	0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%	5
加熱温度	20°C, 100°C, 200°C, 400°C, 600°C	5

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/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)
S	大井川水系産川砂	2.58	2.72	2.08
G	再生粗骨材	2.63	6.43	1.91

表-3 コンクリートの調合

W/C	木材混入率(%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤対セメント(%)
		W	C	S	G	
50	0	170	340	796	980	0.75
	0.5	170	340	792	973	0.80
	1.0	170	340	784	968	0.80
	1.5	170	340	779	960	0.82
	2.0	170	340	774	952	0.85

除去を施した再生粗骨材Hにおいてなお含まれていた木材片不純物の最大寸法をもとに、長さ25mm、φ2.0mmの爪楊枝を使用した。

調合条件は、目標スランプを21.0±1.0cm、目標空気量を4.0±1.0%とした。各コンクリートの調合を表-3に示す。

### 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-2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

測定項目は、フレッシュ性状と表-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)とした。単位容積質量の測定は電子天秤にて行った。外観観察は目視により判断した。供試体寸法は、100φ×200mm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°Cの水中養生を行った。コンクリートのフレッシュ性状を表-6に示す。

### 2.6 加熱方法

加熱は、プログラム調節器付き電気炉を使用した。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

表-4 再生粗骨材の産出に関する情報

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



写真-1 木材片



写真-2 再生粗骨材

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

表-6 コンクリートのフレッシュ性状

W/C	木材混入率(%)	スランプ(cm)	スランプフロー(cm)	空気量(%)	温度(°C)
50	0	22.0	35.5×35.0	3.9	22.0
	0.5	21.0	36.0×34.0	3.9	22.0
	1.0	21.0	35.0×35.0	3.5	22.0
	1.5	20.5	34.5×33.0	3.8	22.0
	2.0	20.5	35.5×33.0	3.8	22.0

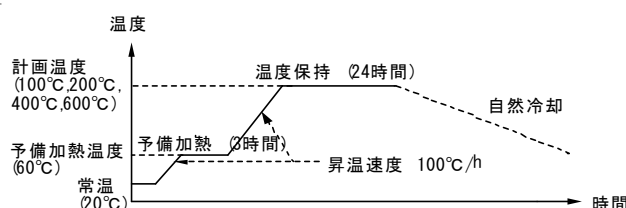


図-1 加熱方法の概要

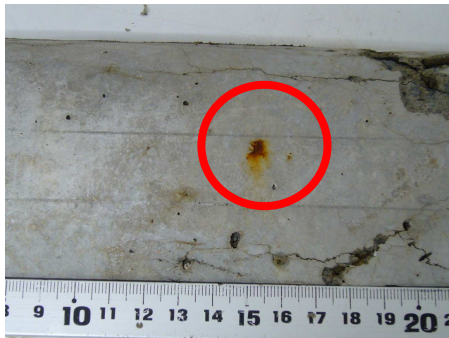


写真-3 100°C加熱後供試体



写真-4 200°C加熱後供試体



写真-5 400°C加熱後供試体



写真-6 600°C加熱後供試体

に従い、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、既往の研究を参考とし、予備加熱を3時間、60°Cで行った。加熱速度は100°C/hとした。計画加熱温度到達後は供試体内部温度が均一となるように、計画加熱温度を24時間保持した。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。測定は降温から5~24時間後常温下で行った。

## 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

図-2に養生期間4週間、8週間、13週間の常温時のコンクリート圧縮強度、図-3に弾性係数を示す。

圧縮強度と弾性係数は、養生期間が長くなるほど大きくなり、木材混入率が多いほど小さくなった。

### 3.2 外観観察

加熱温度100°Cでは写真-3に示すように、コンクリート中に混入させた木材片は完全には炭化しておらず、蒸された状態になっており、供試体表面ににじみ出て茶色に変色していた(○印)。

加熱温度200°Cでは写真-4に示すように、木材片が炭化しており、表面に黒いにじみが確認された(○印)。

加熱温度400°Cでは写真-5に示すように、木材片は完全に炭化しており、指で触ると崩れ落ちた(○印)。

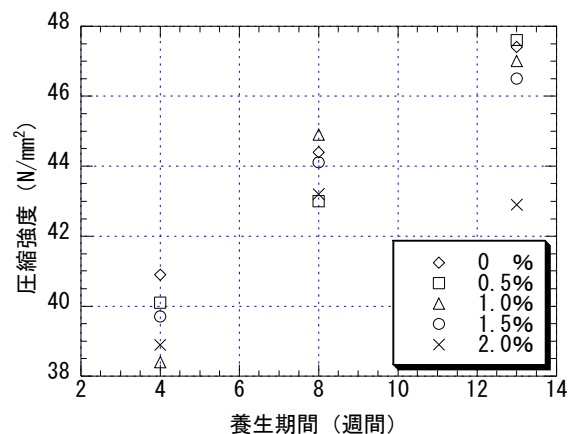


図-2 圧縮強度と養生期間

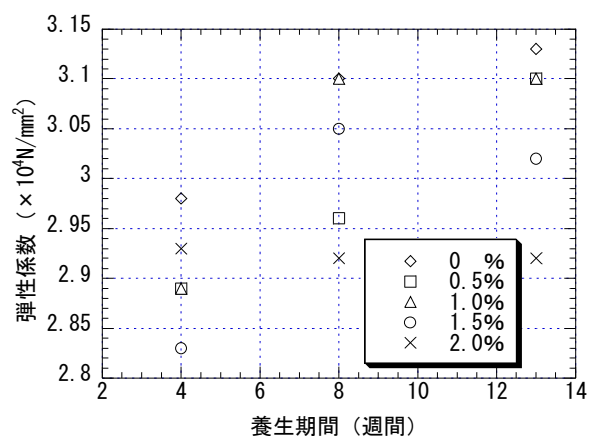


図-3 弾性係数と養生期間

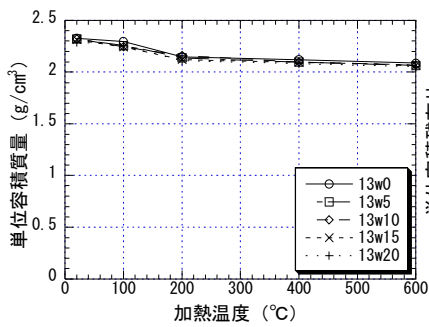


図-4 単位容積質量と加熱温度  
(13週間)

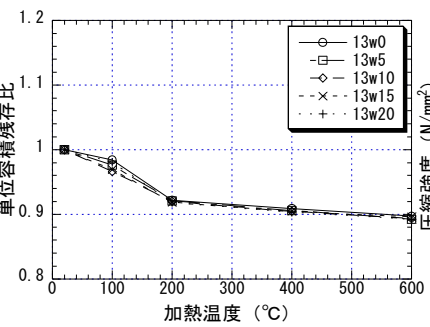


図-5 単位容積質量残存比と加熱温度  
(13週間)

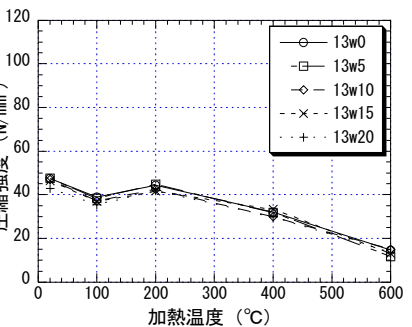


図-6 圧縮強度と加熱温度  
(13週間)

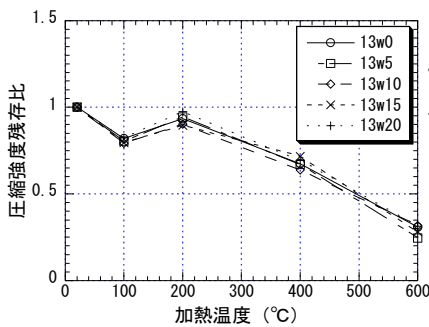


図-7 圧縮強度残存比と加熱温度  
(13週間)

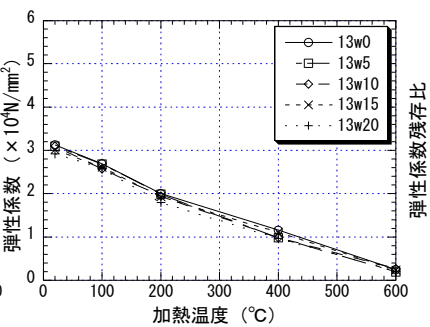


図-8 弾性係数と加熱温度  
(13週間)

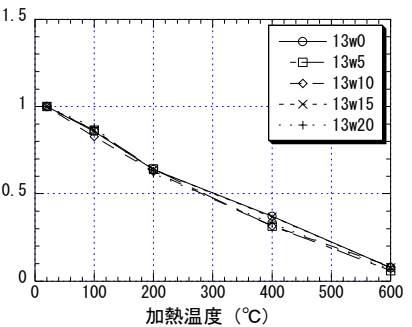


図-9 弾性係数残存比と加熱温度  
(13週間)

加熱温度 600°Cでは写真-6 に示すように、亀甲状のひび割れが多く確認できた。木材片はすべて完全に炭化していた(○印)。

### 3.3 単位容積質量

単位容積質量と加熱温度の関係を図-4 に示す。加熱温度が高いものほど単位容積質量は減少している。本実験では木材片混入率にかかわらず、加熱温度が高くなるとともに単位容積質量が低下している。

単位容積質量残存比と加熱温度の関係を図-5 に示す。単位容積質量残存比は、常温時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。本実験では木材片混入率にかかわらず、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。加熱温度が100°Cから200°Cにおいて、残存比の傾きは各混入率とも大きく、200°Cから600°Cの加熱温度では混入率にかかわらず概ね一定の傾きを示している。

### 3.4 圧縮強度

圧縮強度と加熱温度の関係を図-6 に示す。圧縮強度は、全ての混入率において加熱温度100°Cで低下した後、加熱温度200°Cで上昇し、以降の加熱温度では再び低下した。

圧縮強度残存比と加熱温度の関係を図-7 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。圧縮強度残存比も加熱温度100°Cで低下した後200°Cで上昇し、以降の加熱温度で再び低下

している。単位容積質量と単位容積質量残存比、弾性係数と弾性係数残存比は200°Cでの上昇は見られないが、圧縮強度と圧縮強度残存比のみ200°Cで上昇している。

### 3.5 弾性係数

弾性係数と加熱温度の関係を図-8 に示す。本実験では木材片混入率にかかわらず、加熱温度が高くなるとともに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-9 に示す。弾性係数残存比は、常温時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、木材片混入率にかかわらず、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 複合材料としての弾性係数

筆者らは以前、コンクリートを、骨材と母材モルタルとからなる二層複合材料であると考え、コンクリートの弾性係数  $E_c$  を、骨材の弾性係数  $E_a$  と母材モルタルの弾性係数  $E_m$ 、ならびにそれらの容積混合割合  $V_a$  および  $V_m$  を用いて示した<sup>3)</sup>。そこで、今回の研究では骨材と母材モルタルの関係を木材片とコンクリートの関係に置き換え考察する。複合モデルの理論式は多数あるが、今回の実験においては、Hashin-Hansen 式を<sup>4)</sup>を用いて木材片とコンクリートの複合体として考える。

$$E_c = E_m \{ (1-V_a)E_m + (1+V_a)E_a \} / \{ (1+V_a)E_m + (1-V_a)E_a \} \quad (1)$$

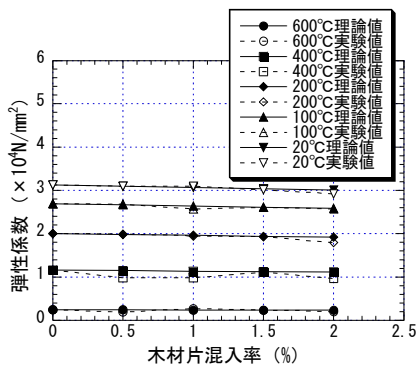


図-10 弾性係数と木材混入率

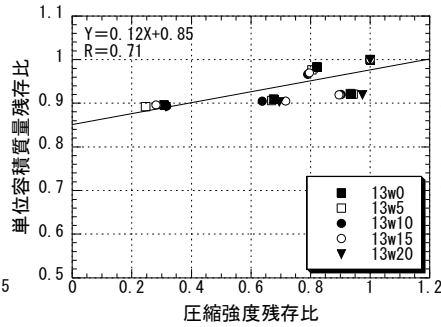


図-11 単位容積質量残存比と  
圧縮強度残存比

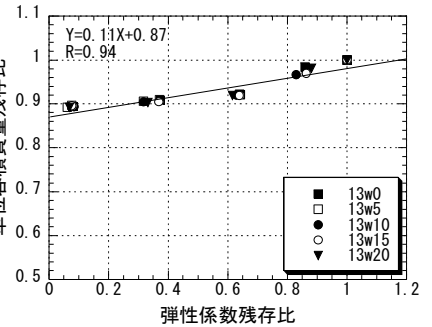


図-12 単位容積質量残存比と  
弾性係数残存比

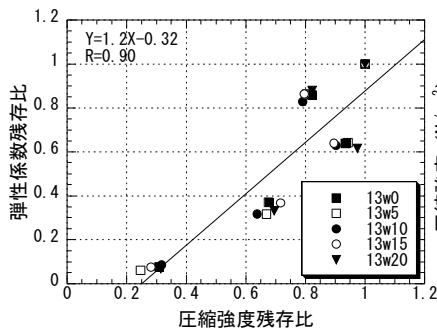


図-13 弾性係数残存比と  
圧縮強度残存比

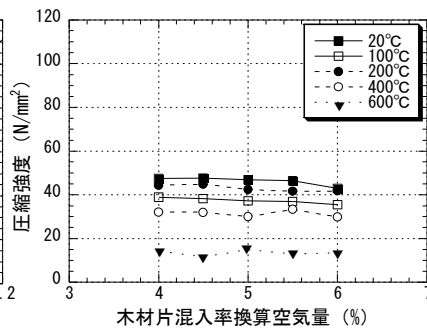


図-14 圧縮強度と  
木材片混入率換算空気量

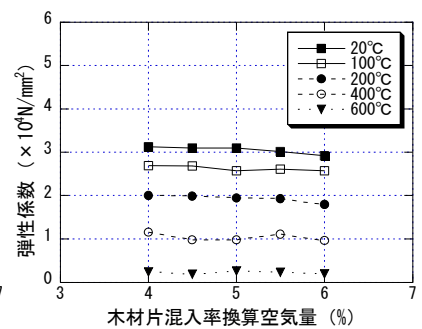


図-15 弾性係数と  
木材片混入率換算空気量

(1) 式において、 $V_a$  に木材片の混入率を、 $E_m$  にコンクリート供試体の弾性係数を、 $E_a$  に木材片の弾性係数を代入し、二層複合材料の弾性係数  $E_c$  を求めた。ただし、木材片の弾性係数はコンクリートの弾性係数に比べて1桁以上小さいことと、加熱温度 200°C以上で炭化することにより、弾性係数を0とした。X軸に木材混入率、Y軸に弾性係数を取り図-10の関係を得た。

加熱温度 400°Cの供試体において、木材混入率が 0.5%、1.0%、2.0%の場合に、実験値が理論値を下回る結果が得られた。しかし、他の各加熱温度、木材混入率においては、実験値と理論値がほぼ同程度の値を示した。

### 3.7 相関式による考察

単位容積質量残存比と圧縮強度残存比の関係を図-11に、単位容積質量残存比と弾性係数残存比の関係を図-12に、弾性係数残存比と圧縮強度残存比の関係を図-13に示す。

本研究の範囲内において、木材片混入率、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。

$$Y=0.12X+0.85 \quad R=0.71 \quad (2)$$

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。

$$Y=0.11X+0.87 \quad R=0.94 \quad (3)$$

同様に、本研究の範囲内において圧縮強度残存比を  $X$ 、弾性係数残存比を  $Y$  とすると、式(4)の関係を得た。

$$Y=1.2X-0.32 \quad R=0.90 \quad (4)$$

本研究の範囲内において、単位容積質量残存比と弾性係数残存比、弾性係数残存比と圧縮強度残存比のそれぞれ間に、相関の高い式を得ることが出来た。単位容積質量残存比と圧縮強度残存比の関係については、供試体が加熱温度 200°Cで強度上昇を起こしたため、他の関係よりも相関が低かった。

### 3.8 木材片混入率換算空気量による考察

(1) コンクリートに混入させた木材片は、高温加熱後に炭化し、力学的に空隙と同等と仮定し、コンクリート調合の空気量の 4.0%に木材片混入率を足した値を木材片混入率換算空気量とする。ただし、今回は加熱温度 20°C、100°Cの場合も同様に扱い検討した。圧縮強度と木材片混入率換算空気量の関係を図-14に示す。木材片混入率換算空気量が 4~6.0%の場合において圧縮強度は減少傾向にあるが、大きな減少とは考えられない。したがって本研究の範囲内の木材片混入率では圧縮強度の大きな減少は見られなかった。

(2) 弾性係数と木材片混入率換算空気量の関係を図-15に示す。木材片混入率換算空気量が 4.0~6.0%の場合において弾性係数は減少傾向にあるが、圧縮強度の結果

と同様に大きな減少とは考えられない。したがって本研究の範囲内の木材片混入率では弾性係数の大きな減少は見られなかった。

#### 4. まとめ

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、実験を行い以下のことが分かった。

- (1) 常温時の圧縮強度と弾性係数は、養生期間が長くなる程大きくなり、木材混入率が多いほど小さくなる。
- (2) 木材片混入率にかかわらず、加熱温度が高いほど、高温加熱後の単位容積質量、圧縮強度、弾性係数は低下する。
- (3) 複合体材料としての弾性係数の検討と、相関式による単位容積質量残存比、圧縮強度残存比、弾性係数残存比の関係を求めた。

(4) 木材片混入率換算空気量が多いほど、圧縮強度と弾性係数は減少傾向にあるが、本研究の範囲内の木材片混入率では大きな減少は見られなかった。

#### 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) 一瀬賢一: 高温加熱を受けた 100N/mm<sup>2</sup> 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
- 3) 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
- 4) コンクリート工学ハンドブック, pp. 467, 朝倉書店, 1981. 11