

論文 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・滝本 憲太*3

要旨：再生粗骨材を使用したコンクリートの安全性を評価するための基礎データとして、再生粗骨材Hを用いたコンクリートの高温加熱後の力学的特性を実験的に検討し、以下の結果を得た。(1)単位容積質量残存比は、加熱温度が高いものほど低下している。(2)圧縮強度は、加熱温度200℃、600℃間で加熱温度が高いものほど低下している。(3)弾性係数は、加熱温度が高いものほど低下している。(4)単位容積質量残存比と圧縮強度残存比・弾性係数残存比、弾性係数残存比と圧縮強度残存比の関係は相関関係にある。(5)各加熱後の単位容積質量残存比、圧縮強度残存比、弾性係数残存比について、再生粗骨材コンクリートと普通コンクリートは似通っている。

キーワード：再生粗骨材、高温加熱、単位容積質量、圧縮強度、弾性係数

1. はじめに

解体工事時に発生するコンクリート解体材の再利用方法として、コンクリートの再生骨材として再利用することは重要である。再生骨材のJIS規格化後、再生骨材を普及させるためにコストもさることながら、その安全性について様々な尺度からその特性の検証を行うことが重要である。

再生粗骨材は再生細骨材に比べてその製造が普及しており、普及初期の段階では、再生骨材を用いたコンクリートは粗骨材のみに再生骨材を用いるものが多いと思われる。また、再生粗骨材の表面に原コンクリートのモルタルが付着しており、これが再生コンクリートの高温加熱後の粗骨材とモルタルの界面の力学的特性に影響を与えると考える。また再生粗骨材の製造時に粗骨材に衝撃を与えるため、再生粗骨材の表面強度の低下も考えられる。

筆者らは従来から高温加熱を受けた高温加熱を受けた普通コンクリート、高強度コンクリート、軽量骨材を用いたコンクリート・モルタルの力学的性質のデータ¹⁻⁷⁾を蓄積してきた。

そこで本研究では、再生粗骨材H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実験

を行い、各加熱後の単位容積質量、圧縮強度、弾性係数を求めた。そして、従来のデータと、本実験で得られたデータをもとに、再生粗骨材コンクリートと普通コンクリートの各加熱後の単位容積質量残存比、圧縮強度残存比、弾性係数残存比について比較・検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件は、表-1に示す水セメント比(W/C)50、30%の2水準、加熱温度20℃(常温、加熱無)と100、200、400、600℃の5水準、供試体養生期間4週水中養生と8週水中養生の2水準とした。

水セメント比は普通コンクリートと高強度コンクリートを想定した。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特異な結果が得られると思われる100℃とした。

過去の実験データと比較をするため、過去の実験条件¹⁾と表-1の実験条件との統一に努めた。

表-1 実験条件

項目	摘要	水準数
水セメント比	50%, 30%	2
加熱温度	20℃, 100℃, 200℃, 400℃, 600℃	5
養生期間	4週水中養生, 8週水中養生	2

*1 名古屋工業大学大学院 都市循環システム工学専攻教授 工博 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 都市循環システム工学専攻 工修 (正会員)

*3 名古屋工業大学 社会開発工学科

2.2 使用材料と調査

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^3), 粗骨材に再生粗骨材(表乾密度: 2.63g/cm^3)を使用した。骨材の品質を表-2に示す。混和剤は, $W/C = 30\%$, $W/C = 50\%$ ともに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。

調査条件は, $W/C = 30\%$ については目標スランプフロー値を $60.0 \pm 10\text{cm}$, $W/C = 50\%$ では目標スランプ値を $21.0\text{cm} \pm 2.5$ とした。目標空気量は, $W/C = 30\%$ では $2.5 \pm 1.0\%$, $W/C = 50\%$ では $3.0 \pm 1.0\%$ とした。各コンクリートの調査を表-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JISの再生粗骨材Hとする。産出に関する情報を表-4に, その写真を図-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, 表中の結果を得た。

再生粗骨材中に含まれる不純物には, 木片, 金属片, プラスチック片, ガラス片等が確認された。その写真を図-2に示す。本実験では, 再生粗骨中の不純物で, 単体で試験結果に影響を及ぼす恐れがあるものを目視により判断し, 取り除いた上で骨材として使用した。

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, 静弾性係数(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, $100\phi \times 200\text{mm}$ 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。養生方法は水中養生とした。打設翌日に脱型を行い, その後は養生期間条件にしたがって, 28日間水温 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, 56日間水温 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 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。概ね目標のスランプ, スランプフロー, 空気量を有するコン

表-2 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm^3)	粗粒率	吸水率 (%)
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 コンクリートの調査

W/C	単位量(kg/m^3)				混和剤 対セメント(%)
	W	C	S	G	
50	170	340	796	980	0.78
30	165	550	774	884	1.3

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

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 フレッシュ性状

W/C (%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	フロー停止時間 (s)	空気量 (%)	温度 ($^\circ\text{C}$)
50	21.5	39.0×39.0	—	3.3	22.5
30	—	63.0×62.0	25.7	2.3	21



図-1 再生粗骨材



図-2 不純物

リートを得た。

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、無載荷の状態にて行った。加熱実験は養生条件に従い、4週水中養生終了後と8週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¹⁾を参考とし、予備加熱を3時間、60℃で行った。加熱速度は100℃/hr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-3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60℃以下になるまで供試体を炉内に放置した。その後、密閉状態にて供試体温度を常温にまで下げた。測定は降温から5～24時間後常温下で行った。

表-7に本研究で用いる記号の内容を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 外観観察

高温加熱時の供試体の爆裂は、水セメント比30%、8週養生、加熱温度600℃条件の供試体でのみ確認した。爆裂の状況は、供試体から大きさ30mm程の破片が剥がれ落ちるというものである。その他には、大きな損傷は見られなかった。

加熱温度100℃、200℃では表面が白色に変化した。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た。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た。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。水セメント比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。

本研究では使用した再生粗骨材内の不純物による影響が確認された。不純物の影響は大別して、プラスチック片が供試体外部に溶け出したものと、木片が熱で劣化し供試体表面が破損したものの2種類が確認された。影響が見られた供試体の

表-7 本研究の記号の内容

記号 内容	記号 内容
50:水セメント比50%	4w:4週養生
30:水セメント比30%	8w:8週養生

表-8 常温の物性

養生期間 (週)	水セメント 比(%)	密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)
4	50	2.36	44.5	2.98
	30	2.43	78.0	3.86
8	50	2.36	48.7	3.10
	30	2.43	79.9	3.84

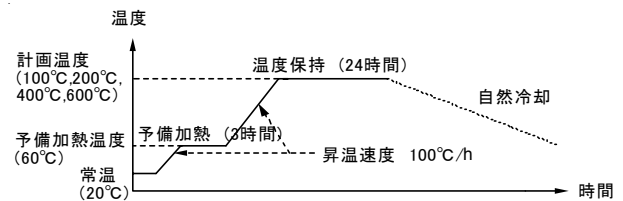


図-3 加熱方法の概要

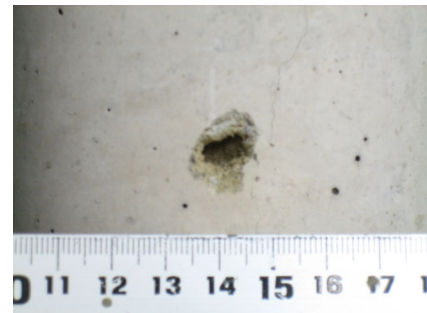


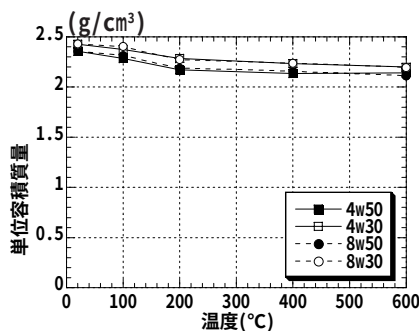
図-4 供試体への影響の様子
(木片による)



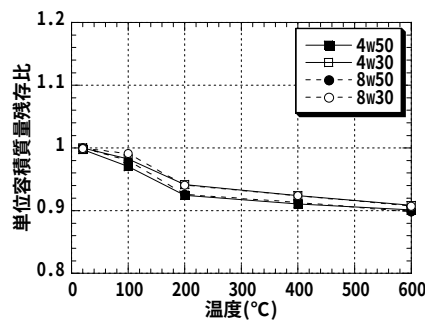
図-5 供試体への影響の様子
(プラスチック片による)

サンプル数が少ないものの、前者は加熱温度100℃、200℃で、後者は加熱温度400℃、600℃で確認した。これらの影響が見られた供試体も、損傷がひどいものを除き圧縮実験を行った。木片による供試体への影響の様子を図-4、プラスチック片による供試体への影響の様子を図-5に示す。

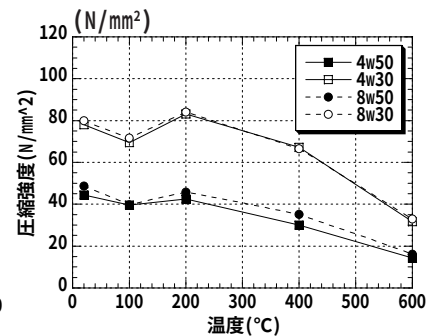
なお、表-8に常温の物性値を示す。



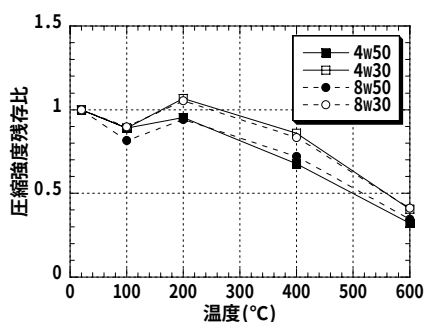
図－6 単位容積質量と加熱温度



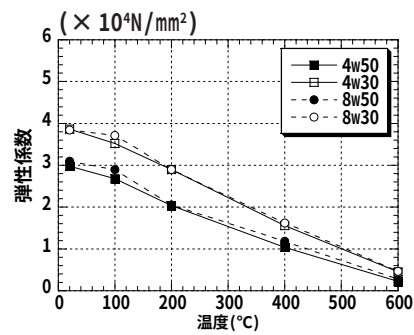
図－7 単位容積質量残存比と加熱温度



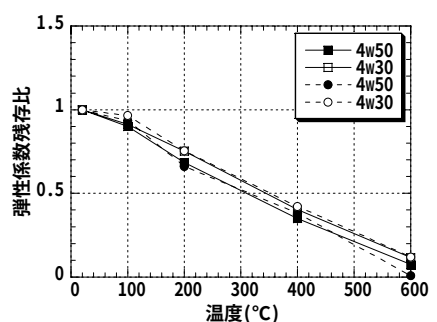
図－8 圧縮強度と加熱温度



図－9 圧縮強度残存比と加熱温度



図－10 弾性係数と加熱温度



図－11 弾性係数残存比と加熱温度

3.2 単位容積質量

単位容積質量と加熱温度の関係を図－6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。

単位容積質量残存比と加熱温度の関係を図－7に示す。単位容積質量残存比は、常温時単位容積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。水セメント比の大きいものの方が、単位容積質量残存比の減少が大きい。これはW/C＝30%よりもW/C＝50%の方がコンクリート中の空隙が多く、そこに自由水を多量に含むためであると考えられる。

3.3 圧縮強度

圧縮強度と加熱温度の関係を図－8に示す。圧縮強度はW/C＝30%、W/C＝50%ともに加熱温度100℃で低下した後、加熱温度200℃で上昇に転じ、以降の加熱温度では再び低下した。再生粗骨材内の不純物による影響の出た供試体の圧縮強度は、同水準の他の供試体と比較して、平均値より+1.1N/mm²(+4.3%)であり、明確な差は認められなかった。

圧縮強度残存比と加熱温度の関係を図－9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。加熱温度200℃と600℃間の圧縮強度残存比の様子を見ると、水セメント比、養生期間にかかわらず一定の変化量で低下している。

3.4 弾性係数

弾性係数と加熱温度の関係を図－10に示す。弾性係数の違いによる弾性係数の差は、加熱温度が高くなるほど小さくなっており、加熱温度600℃ではほぼ等しくなっている。再生粗骨材内の不純物による影響の出た供試体の弾性係数は、同水準の他の供試体と比較して、平均値より+0.05×10⁴N/mm²(+6.9%)であり、明確な差は認められなかった。

弾性係数残存比と加熱温度の関係を図－11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圧縮強度の比である。本実験では、水セメント比、養生期間にかかわらず、加熱温度が高くなるとともに、弾性係数残存比が低下することを確認した。

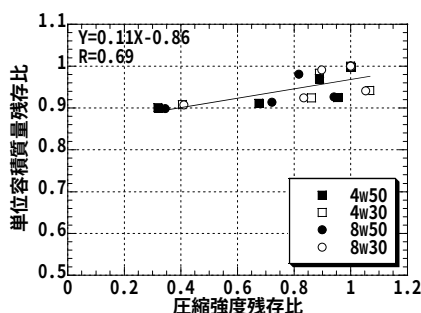


図-12 単位容積質量残存比と圧縮強度残存比

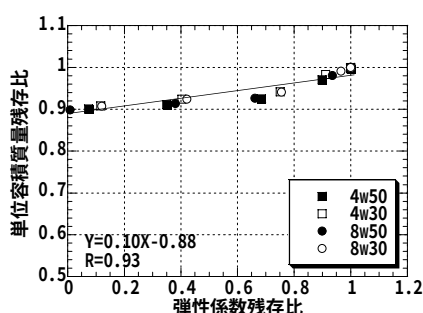


図-13 単位容積質量残存比と弾性係数残存比

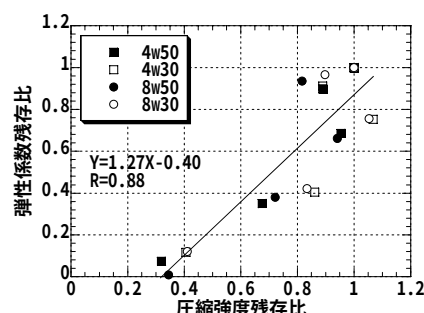


図-14 弾性係数残存比と圧縮強度残存比

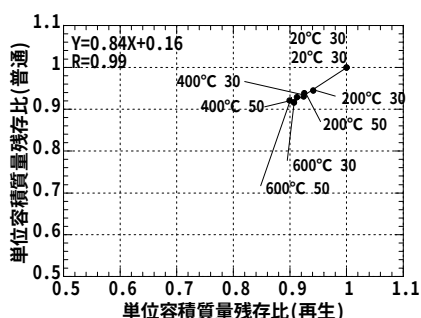


図-15 再生と普通の単位容積質量残存比

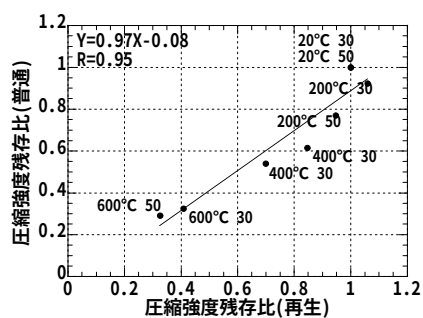


図-16 再生と普通の圧縮強度残存比

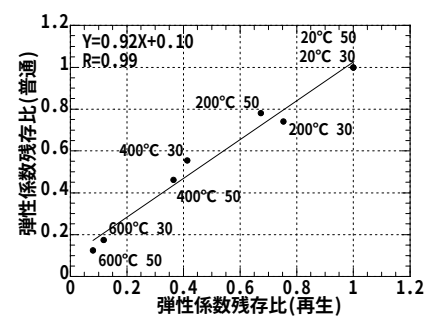


図-17 再生と普通の弾性係数残存比

3.5 実験結果の考察

単位容積質量残存比と圧縮強度残存比の関係を図-12に、単位容積質量残存比と弾性係数残存比の関係を図-13に、弾性係数残存比と圧縮強度残存比の関係を図-14に示す。研究の範囲内において、水セメント比、加熱温度、養生期間を区別せず、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(1)の関係が成り立つ。

$$Y=0.11X-0.86 \quad R=0.69 \quad (1)$$

同様に、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(2)の関係が成り立つ。

$$Y=0.10X-0.88 \quad R=0.93 \quad (2)$$

同様に、圧縮強度残存比をX、弾性係数残存比をYとすると、式(3)の関係が成り立つ。

$$Y=1.27X-0.40 \quad R=0.88 \quad (3)$$

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の間に、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。

4. 普通コンクリートとの比較

4.1 比較対象について

比較に用いる普通コンクリートの性質は、「河辺伸二，一瀬賢一，川口徹：高温加熱を受けたコンクリートの養生方法と力学的性質，コンクリート工学年次論文集，26-1，pp.687-692，2004.7」のデータを用いる。本研究は，上記の研究と似通った実験条件下で行った。比較は，同一の加熱温度と水セメント比を基準とした。

4.2 単位容積質量の比較

単位容積質量残存比の再生粗骨材を使用したコンクリートと普通コンクリートについての比較を図-15に示す。単位容積質量残存比について，本研究の範囲内において再生粗骨材コンクリートの値をX，普通コンクリートの値をYとすると式(4)の関係が成り立つ。

$$Y=0.84X+0.16 \quad R=0.99 \quad (4)$$

相関の範囲が狭いため多少のずれがあるものの，高い相関関係にある。以上のことから，本研究の範囲内において，普通コンクリートと再生粗骨材を使用したコンクリートの単位容積質量残存

比関係は、似通っているといえる。

4.3 圧縮強度の比較

圧縮強度残存比の再生粗骨材を使用したコンクリートと普通コンクリートについての比較を図-16に示す。圧縮強度残存比について、本研究の範囲内において、再生粗骨材コンクリートの値をX、普通コンクリートの値をYとすると式(5)の関係が成り立つ。

$$Y=0.97X-0.08 \quad R=0.95 \quad (5)$$

各点も相関範囲内に均等にあり、信頼性も高いといえる。以上のことから、本研究の範囲内において、普通コンクリートと再生粗骨材を使用したコンクリートの圧縮強度残存比の関係は、似通っているといえる。

4.4 弾性係数の比較

弾性係数残存比の再生粗骨材を使用したコンクリートと普通コンクリートについての比較を図-17に示す。弾性係数残存比について、本研究の範囲内において、再生粗骨材コンクリートの値をX、普通コンクリートの値をYとすると式(6)の関係が成り立つ。

$$Y=0.92X+0.10 \quad R=0.99 \quad (6)$$

各点も相関範囲内に均等にあり、信頼性も高いといえる。以上のことから、本研究の範囲内において、普通コンクリートと再生粗骨材を使用したコンクリートは、弾性係数残存比の関係は、似通っているといえる。

5. 結論

再生粗骨材Hを使用したコンクリートの高温加熱による力学的性質の変化について、水セメント比と養生期間をパラメータとし、実験的に検討、考察を行い、以下のことがわかった。

- (1)単位容積質量残存比は、加熱温度が高いものほど低下している。
- (2)圧縮強度は、加熱温度 200℃、600℃間で加熱温度が高いものほど低下している。
- (3)弾性係数は、加熱温度が高いものほど低下している。
- (4)単位容積質量残存比と圧縮強度残比、弾性係

数残存比、弾性係数残存比と圧縮強度残存比の関係は、相関関係にある。

- (5)各加熱後の単位容積質量残存比、圧縮強度残存比、弾性係数残存比は、再生粗骨材コンクリートと普通コンクリートは似通っている。

謝辞 本研究に協力いただきました竹本油脂株式会社星野実氏と、再生粗骨材Hを提供いただきました株式会社竹中工務店に謝意を表します。

参考文献

- 1)河辺伸二，一瀬賢一，川口徹：高温加熱を受けたコンクリートの養生方法と力学的性質，コンクリート工学年次論文集，26-1，pp.687-692，2004.7
- 2)河辺伸二，一瀬賢一，川口徹，長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，25-1，pp.377-382，2003.7
- 3)一瀬賢一，川口徹，長尾覚博，河辺伸二：高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復，コンクリート工学年次論文集，25-1，pp.353-358，2003.7
- 4)一瀬賢一，河辺伸二：高温加熱を受けた高強度コンクリートの圧縮強度の推定，日本建築学会構造系論文集，561，pp.17-21，2002.11
- 5)一瀬賢一，川口徹，長尾覚博，河辺伸二：高温加熱を受けた軽量コンクリートの力学的性質，コンクリート工学年次論文集，23-2，pp.397-402，2001.6
- 6)河辺伸二，岡島達雄，伊藤嘉規：軽量骨材を用いたコンクリート・モルタル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，20-2，pp.535-540，1998.6
- 7)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