

論文 粗粒アッシュを細骨材の一部に代替したコンクリートの性質

川崎真治*¹・河野清*²・山地功二*³・馬越唯好*⁴

要旨：石炭火力発電所より排出される粗粒のボトムアッシュを細骨材として川砂の一部に代替使用し（0, 10, 20, 30 および 40%）コンクリートの圧縮強度，引張強度，乾燥収縮，耐凍害性，耐摩耗性などの性質に及ぼす影響を検討した。その結果，石炭灰の代替率が高くなるほど強度は増大する傾向が得られ，乾燥による長さ変化率は減少する傾向が見られた。また，相対動ヤング係数の変化で示される耐凍害性は代替率30%の配合では多少低下する傾向が見られた。なお，耐摩耗性は良好な結果が得られた

キーワード：粗粒アッシュ，代替率，圧縮強度，乾燥収縮，耐凍害性，耐摩耗性

1. はじめに

現在，電力需要の増加に伴い発電所の建設が促進されている。しかし，石油燃料の大量消費，原子力発電所の建設用地の確保の困難なことなどから石炭による火力発電が見直されつつある。今後，石炭火力発電所が増加し，それとともない石炭の消費量の増加が予想される。従来，我が国において石炭火力発電所から排出される石炭灰のうち，フライアッシュは，混合セメント用やコンクリート混和材用とされてきたが，粗粒のボトムアッシュ（以下，粗粒アッシュといい，図表にはCAと略記）は埋立てに使用されてきた。

また，近年良質なコンクリート用骨材の枯渇化が問題となりつつある。特に細骨材は今後河川からの採取が一層困難となり，一般に川砂より劣る陸砂，山砂，海砂，砕砂などの使用に移行せざるを得ない状況にある。また，平成3年度からの公共工事の基本計画の実施など骨材需要は増大する傾向があり，21世紀を展望するときこれらの骨材の確保が一層困難になると考えられる。

そこで本研究では，粗粒アッシュを細骨材として川砂の一部に代替使用したコンクリートについて，圧縮強度，引張強度，乾燥収縮さらに耐久性の一部として凍結融解作用の繰り返しに対する耐凍害性と耐摩耗性についての基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

(1) セメント

普通ポルトランドセメント（比重 3.15，28 H 圧縮強さ 41.6MPa）を使用した。

(2) 骨材

粗骨材：徳島県那賀川産玉砕石（比重 2.64，吸水率 1.08%，最大寸法 25mm）

細骨材：徳島県那賀川産川砂（比重 2.60，吸水率 1.72%，粗粒率 2.78）

粗粒アッシュ：愛媛県西条火力発電所（比重 1.97，吸水率 6.4%，粗粒率 2.34）

* 1 徳島大学大学院工学研究科建設工学専攻（正会員）

* 2 徳島大学教授工学部建設工学科，工博（正会員）

* 3 徳島大学大学院工学研究科建設工学専攻（正会員）

* 4 （株）四国総合研究所土木技術部，副主席研究員（正会員）

使用した粗・細骨材および粗粒アッシュのふるい分け試験結果は図-1に、また電力会社より入手した粗粒アッシュの化学成分は表-1に示す。

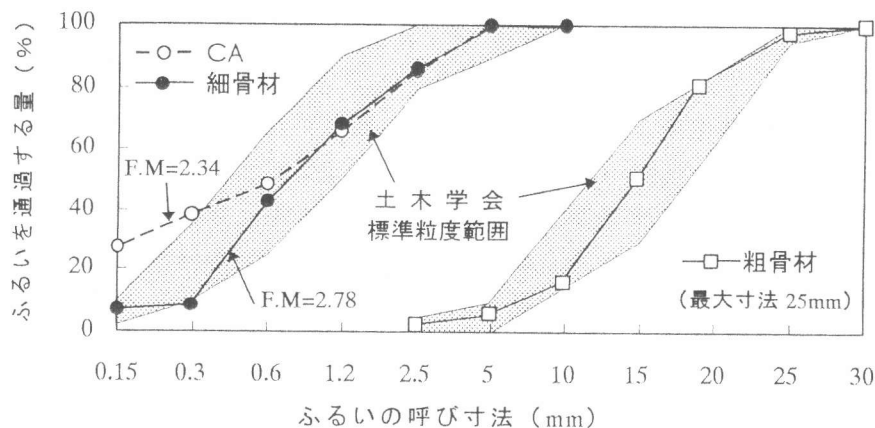


図-1 粗・細骨材ふるい分け試験結果

表-1 粗粒アッシュの主な化学成分

使用材料	化 学 成 分 (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
CA	54.5	25.1	5.0	2.5	0.5	0.9	1.5	0.1

(3) 混和剤

混和剤はリグニン・アルキルアシルスルホン酸系の高性能 AE 減水剤とアルキルカルボン酸系の AE 剤を使用した。

2. 2 実験

(1) コンクリートの配合

コンクリートの配合は目標スランプを 12cm、目標空気量 4%、水セメント比を 50% に一定とし細骨材の容積に対する粗粒アッシュの代替率を 0, 10, 20, 30 および 40% と設定 (以下、それぞれ PL, CA10, CA20, CA30 および CA40 と略記) した。コンクリートの配合を表-2 に示す。

表-2 使用したコンクリートの配合

	骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G	A E 減水剤	A E 剤
								S	CA			
PL						763		0			1.92	0.19
CA10						686		58			2.24	0.24
CA20	25	12±2	4±1	50	42	160	320	610	116	1069	2.56	0.29
CA30								534	173		3.20	0.32
CA40								458	231		3.84	0.35

(2) 成形および養生方法

コンクリートは強制 2 軸型ミキサで 30 秒間空練りを行い、水を加えて 90 秒間練りませ、供試体は φ10×20cm 円柱型枠および □10×10×40cm はり型枠に成形した。打設後 24 時間恒温室 (温度 20±1℃, 相対湿度 60±5%) に静置し、脱型後所定の材齢まで 20±1℃ の水中で標準養生 (以下、20℃標準養生と略記) を行った。

(3) 試験項目および試験方法

(a) 圧縮強度および引張強度

圧縮強度試験は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いて、すべての配合のコンクリートについて材齢7日、28日および91日でJIS A 1108に準拠して行った。引張強度試験は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体を用いて、3種類の配合のコンクリート（PL, CA10, CA30）について材齢7日、28日および91日においてJIS A 1113に準拠して測定した。

(b) 静ヤング係数および動ヤング係数

静ヤング係数および動ヤング係数の測定は圧縮強度試験時にその供試体を用いて行った。静ヤング係数は土木学会規準に準拠しコンプレッションメーターを用いて測定した。動ヤング係数はJIS A 1127に準拠して共鳴振動数を測定し動ヤング係数を求めた。

(c) 乾燥収縮

材齢7日まで 20°C 標準養生を行った $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ はり供試体を、水中より取り出して基長を測定し温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温室において乾燥養生を行い、所定の材齢で乾燥収縮量を測定した。この乾燥収縮量は、JIS A 1129に準拠してはり供試体に貼り付けたゲージプラグ間の距離をダイヤルゲージを用いて測定し、長さ変化率で求めた。

(d) 耐凍害性

耐凍害性を調査するため凍結融解試験を行った。材齢28日まで 20°C 標準養生を行った $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ はり供試体を用いて水中急速凍結融解試験法（ $5^\circ\text{C} \sim -18^\circ\text{C}$ 、1サイクル4時間）で300サイクルまで測定し、所定のサイクルで動ヤング係数および質量を測定した。

(e) 耐摩耗性

コンクリートの耐摩耗性試験は材齢28日まで 20°C 標準養生を行った $\phi 15 \times 4\text{cm}$ の円盤供試体を用いて、ASTM C779の規定に従いアブレーション摩耗試験機を用いて行った。実験は回転数220rpm、加圧力84Nで0、2000、4000、6000、8000および10000回転時の質量を測定し、その減少量から供試体のすり減り深さを計算により求めた。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

20°C 標準養生下での材齢7日、28日および91日の圧縮強度を図-2に示す。一般に、吸水率の大きい骨材を用いると強度発現は低下するといわれており、また、河野らの研究[1]によると、モルタルにおいてセメントの外割りで粗粒アッシュを使用した場合多少変動があるがほぼ同程度の強度発現があると報告している。

今回用いた粗粒アッシュは吸水率が6.4%と大きいにもかかわらず、 20°C 標準養生下においては普通コンクリートとを比較した場合、材齢7日においては、ほぼ同等かそれ以上の強度発現を示し、材齢28日においては代替率の低いものは多少劣るものの、代替率の高い配合（CA30, CA40）はともに普通コンクリートより大きい強度発現性を示している。また、材齢91日においても同様にCA30およびCA40は普通コンクリートより高い強度発現を示した。CA10およびCA20は、ほぼ同程度の強度発現を示しており、粗粒アッシュを細骨材の一部に代替したコンクリートを用いても強度発現の面からは特に問題がないことが確認された。小林ら[2]は細骨材の粒度調整用に炉底灰が使用できることを報告している。

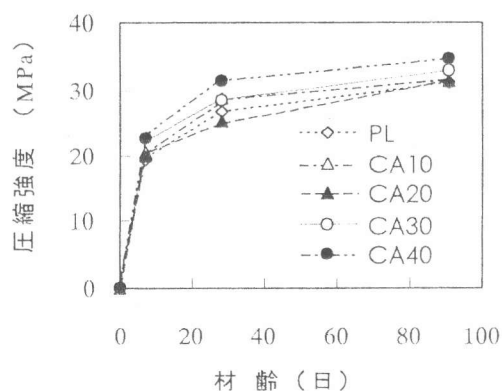


図-2 材齢と圧縮強度

3. 2 引張強度

20°C標準養生下での材齢7日、28日および91日の引張強度を図-3に示す。河野ら[1]はコンクリートに粗粒アッシュをセメントの内割りで5%使用したコンクリートで引張試験を行い、ほぼ同程度かそれ以上の強度発現性があると報告しているが、今回の実験においても同様に、引張強度は粗粒アッシュを用いたものと普通コンクリートを比較しても、すべての材齢において同程度の強度発現性が認められ、粗粒アッシュを細骨材の一部に代替したコンクリートを用いても引張強度発現性に問題がないことが認められた。

3. 3 圧縮強度と静ヤング係数との関係

20°C標準養生を行った供試体の圧縮強度と静ヤング係数との関係を図-4に示す。粗粒アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度と静ヤング係数との間には良好な相関関係が見られ、通常のコンクリートと同様に両者の関係を用いてコンクリートの品質を推定することが可能であると考えられる。また、粗粒アッシュコンクリートと普通コンクリートとを比較すると、同一強度の場合全体に普通コンクリートの方が幾分静ヤング係数が大きくなっている。粗粒アッシュは比重が川砂より小さいため、これを用いたコンクリートの静ヤング係数が多少小さくなったと考えられる。

3. 4 圧縮強度と動ヤング係数との関係

圧縮強度と動ヤング係数との関係を図-5に示す。粗粒アッシュを用いたコンクリートにおいて、圧縮強度と動ヤング係数との間には高い相関関係が見られ、通常のコンクリートと同様に動ヤング係数を測定することによる非破壊試験でコンクリートの品質を推定することが可能であるといえる。また、普通コンクリートと比較してみると、静ヤング係数と同様に粗粒アッシュを用いたコンクリートの動ヤング係数は幾分低い傾向が見られた。

3. 5 乾燥収縮

材齢と乾燥による長さ変化率いわゆる乾燥収縮との関係を図-6に示す。コンクリートの乾燥収縮は、配合や湿度などの条件によって異なるが、通常は0.06%~0.1%程度である。本実験においては、材齢91日までの結果ではあるが長さ変化率は0.06%~0.08%の範囲であった。今後さらに材齢をのばし、長期の長さ変化率を測定しなければならないが、材齢

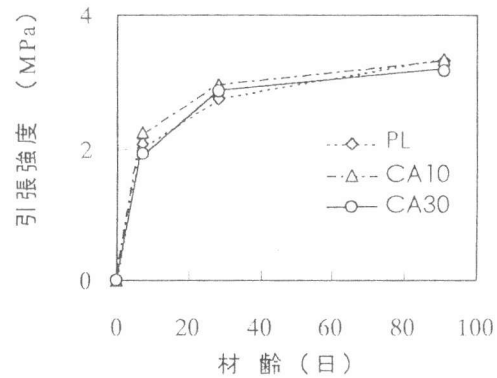


図-3 材齢と引張強度 (日)

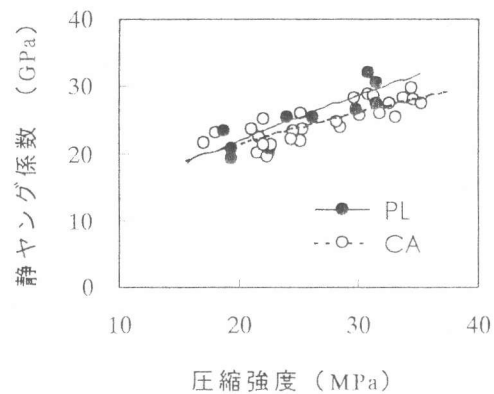


図-4 圧縮強度と静ヤング係数との関係

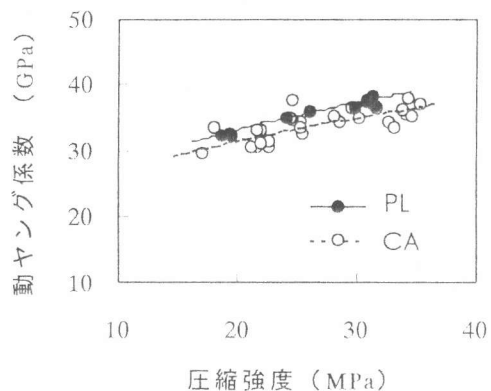


図-5 圧縮強度と動ヤング係数との関係

91日の段階においては、粗粒アッシュを用いたものの方が普通コンクリートと比較して小さいことが認められ、また細骨材に対する粗粒アッシュの代替率が高いほど、より長さ変化率が小さいことが確認できた。一般にコンクリートの乾燥収縮は、単位水量、単位セメント量、空気量、セメントの種類、混和材料、骨材の品質、養生方法などに影響されるが、本実験における条件では、骨材の品質つまり細骨材に対する粗粒アッシュの代替率による違いのみであるので、これが影響したと考えられる。粗粒アッシュと川砂の違いは、比重、吸水率と粒度であるが、このうち粒度に関して、今回の実験に用いた川砂の粒度分布は土木学会の標準粒度分布の範囲内に含まれているが、粗粒アッシュは図-1に示したように0.15mm以下の微粒がかなり多いため、乾燥収縮においてこの微粒部分がコンクリート中の水分を保持し、すなわち保水性が収縮に影響を及ぼしたと考えられる。乾燥収縮において、コンクリート中の細骨材に対する粗粒アッシュの代替率を増加させることは、少なくとも不利にならないことを示している。

3.6 耐凍害性

耐凍害性を調査するため凍結融解試験を行った結果を、0サイクル時の動ヤング係数に対する各サイクル時の動ヤング係数の比を相対動ヤング係数として図-7に示し、質量減少率を図-8に示す。300サイクル終了時において粗粒アッシュで30%代替したコンクリート(CA30)は相対動ヤング係数が67%、比較用の普通コンクリート(PL)は84%であり、質量減少量もCA30は6.8%であり、普通コンクリートの2.4%に比べ大である。両者を比較するとCA30の方が多少劣る結果を示している。今日、AE剤やAE減水剤を用いたコンクリートが一般的なので今回は、両者とも空気量4%のAEコンクリートで実験を行ったが、粗粒アッシュを用いた場合明らかに相対動ヤング係数が低くなっているため、今後、耐凍害性を向上させるためにも、代替率を低くした配合(CA10およびCA20)にするか、AE剤の使用量を多くし空気量を5%あるいは6%と多くした配合を用いて、さらに研究する必要がある。

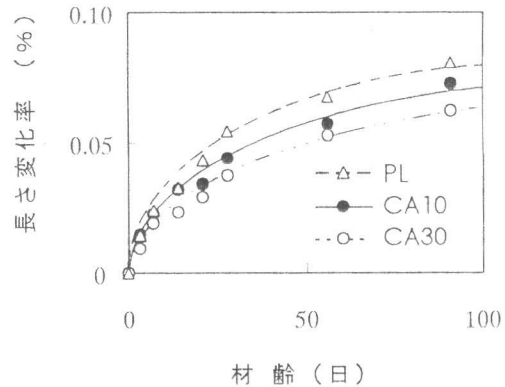


図-6 材齢と乾燥による長さ変化率との関係

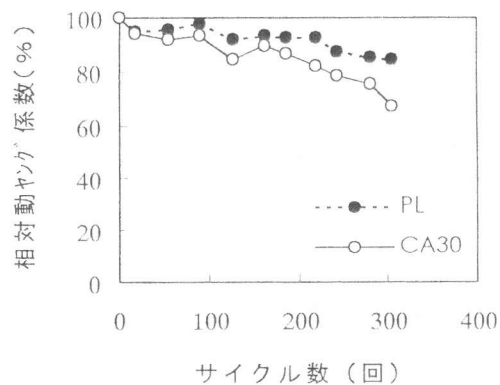


図-7 凍結融解試験における相対動ヤング係数

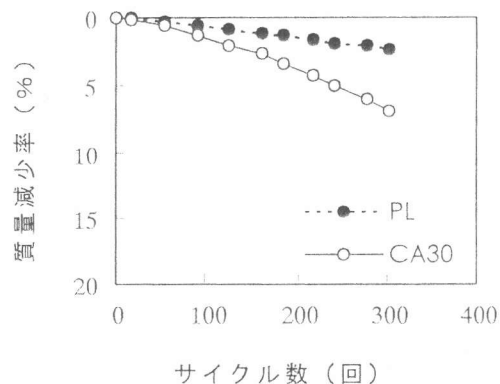


図-8 凍結融解試験における質量減少率

3. 7 耐摩耗性

コンクリートの耐摩耗試験結果を図-9に示す。粗粒アッシュを用いたコンクリート(CA30)と普通コンクリート(PL)とを比較すると今回の実験においては、前者の方がすり減り深さが小さい結果となった。粗粒アッシュは吸水率も高く、比重も小さいことから粗粒アッシュ自体の内部空隙は大きいと考えられ、そのため耐摩耗性が劣ると予想していたが、実験結果はその逆となり耐摩耗性は良好な結果となった。これはおそらく粗粒アッシュは微粒部分が多いことが影響したのではないかと考えられるが、今後、

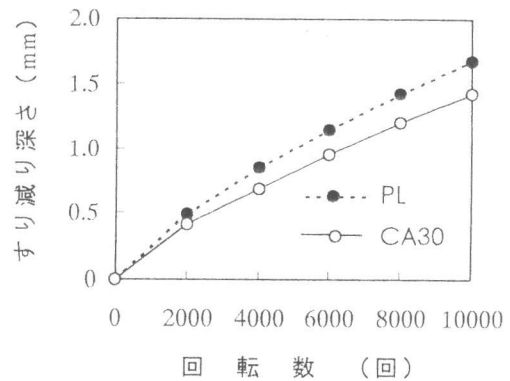


図-9 耐摩耗性試験結果

代替率を変えた配合を用いて耐摩耗性についてもさらに調査する必要があると考えられる。

4. まとめ

粗粒のボトムアッシュを細骨材の一部に使用することを目的に、容積で代替率を0, 10, 20, 30 および 40%と変化させたコンクリートの圧縮強度、引張強度、静ヤング係数、動ヤング係数、乾燥収縮、耐凍害性および耐摩耗性を調査した結果、本実験の範囲内で次のことがいえる。

- (1) 粗粒アッシュを細骨材に代替使用したコンクリートの圧縮強度は、代替率 0~40%の範囲で代替率が大きくなるほど増加する傾向が見られる。
- (2) 粗粒アッシュを用いたコンクリートの材齢 7 日、28 日および 91 日の引張強度は普通コンクリートとほぼ同等であり、通常の使用に対して問題がないと思われる。
- (3) 圧縮強度と静ヤング係数あるいは動ヤング係数との関係は良好な相関関係が認められ、粗粒アッシュで代替したコンクリートは普通コンクリートと比べて両者の値とも多少小さくなる。
- (4) 乾燥収縮量は、細骨材に対し粗粒アッシュの代替率 10 および 30%のコンクリートの場合、普通コンクリートに比べ低くなっており代替率の多い方が低下が顕著である。
- (5) 耐凍害性は、粗粒アッシュで 30%代替したコンクリートは普通コンクリートと比べて多少劣る傾向がある。今後は、空気量、代替率などを変えた配合で調査する必要がある。
- (6) コンクリートの耐摩耗性は、粗粒アッシュを用いたコンクリートの場合良好な結果が得られたが、粗粒アッシュの種類や配合をかえ今後さらに検討する必要がある。

謝辞

本研究の実施にあたり、四国電力株式会社、および株式会社四国総合研究所の方々には多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 河野 清, 吉栖伸輔: シンダーアッシュおよびフェロシリコンダストのモルタル・コンクリートへの利用に関する検討, コンクリート工学年次講演会講演論文集, No.18, pp.69-72, 1981
- 2) 小林正凡, 野口博章: 石炭火力発電所のアッシュのコンクリート材料としての利用, コンクリート工学年次講演会講演論文集, No.20, pp.77-80, 1980