

論文 クリンカーアッシュのコンクリート二次製品用骨材としての適用性検討

佐々木 肇*1・新谷 登*2・斉藤 直*3・喜多達夫*4

要旨:コンクリート二次製品用細骨材として石炭火力発電所から産出されるクリンカーアッシュの適用性を検討した結果、

- 1) フレッシュコンクリートにおいて、スランプが大きくなるが、クリンカーアッシュの一部を石炭灰原粉に置換することにより所要のコンシステンシーが得られる。
- 2) 硬化コンクリートの圧縮強度は、川砂を使用したコンクリートとほぼ同程度である。
- 3) 重金属類の溶出は基準値を満たすものであり、環境への影響は少ない。

ことから、クリンカーアッシュは、代替細骨材として使用できる可能性が考えられた。

キーワード:クリンカーアッシュ、有効利用、細骨材、コンクリート二次製品

1. はじめに

近年、良質な骨材の確保が困難になりつつある。特に細骨材に関しては、新たな採石場の確保の困難、川砂・海砂の採取の制限などにより、今後さらに確保が困難になることが予想される。例えば広島県では、海砂の採取が1998年(平成10年)から禁止されたため代替細骨材の確保は重要な課題となっている¹⁾。

一方、再生骨材の利用拡大や各種のスラグや焼却灰などの産業副産物をコンクリート用骨材としての有効利用することが検討されているが、コスト面、重金属類の含有、溶出による環境負荷への影響など解決しなければならない課題も多い。しかし、こうした点を解決すれば、産業副産物の中にも、細骨材の代替資源として活用可能なものも多く、石炭火力発電所から産出されるクリンカーアッシュもその一つと考えられる。

クリンカーアッシュは、石炭火力発電所において、赤熱状態でボイラー底部の水槽中に排出される石炭灰を破砕機で粉砕、粒度調整したもので、急冷水洗されているため、化学的に安定した性質を持つ。

写真-1にクリンカーアッシュの形状を示す。

クリンカーアッシュ発生量は、石炭灰発生量の約5~15%を占め、今後、石炭火力発電所の増加によりその発生量も1992年度の約40万tから、2000年以降は約90万tと倍増することが予想されているのに対して、埋戻し材、排水材などの土質

材料やセメント原料として一部が有効利用されているが、大部分が埋立て処分されているのが現状である。このため、クリンカーアッシュの有効利用方法を開発することは、資源の有効利用および環境負荷の低減の面から重要な課題となっている。

クリンカーアッシュのコンクリート用骨材への適用は、川村らの研究により、軽量骨材に類似しているものの強度、耐久性が小さいことが報告されている²⁾。しかし、最近では、炉自体の性能が進歩しているため、産出されるクリンカーアッシュの性状も大きく変化している。

このため、本研究では、最近の炉から産出されるクリンカーアッシュを用い、天然骨材使用量の

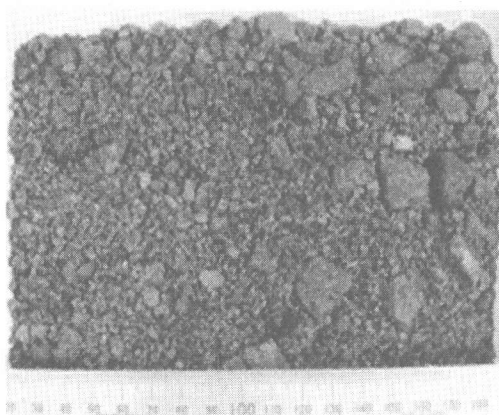


写真-1 クリンカーアッシュの形状

*1 (株) 間組技術研究所技術研究部先端研究室主任研究員

*2 中国電力(株) 土木部石炭灰有効活用プロジェクトマネージャー

*3 中国電力(株) 土木部石炭灰有効活用プロジェクト副長

*4 (株) 間組技術研究所技術研究部長

削減と資源有効利用および環境負荷の低減の観点から、骨材としての適用性を検討した。

これらの検討のうち、本論文においては、クリンカーアッシュをコンクリート二次製品用細骨材として適用性を検討した結果に関して取りまとめを行ったものである。

2. 試験方法

試験に用いた材料の一覧を表-1に示す。

クリンカーアッシュの性状確認試験は、ふるい分け試験、密度・吸水率試験、実積率試験、化学成分分析、X線回折分析、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察、成分分析、有害金属の含有量試験および溶出試験を行った。骨材試験方法は、JISの試

表-1 試験に用いた材料

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 : 3.16 g/cm ³
細骨材	大井川産川砂 密度 : 2.62 g/cm ³ 吸水率 : 1.08%, F.M : 3.00
クリンカーアッシュ	中国電力 新小野田火力発電所
石炭灰原粉	密度 : 2.19 g/cm ³
粗骨材	秩父産碎石, 2.69 g/cm ³ 吸水率 : 0.79%
混和剤	高性能AE減水剤 メラニン系

験方法に準じて行った。また、有害金属の含有量試験は底質調査方法 (環水管 第127号)、溶出試験は環境庁告示第46号に準じて行った³⁾。

なお、試験項目は、総水銀、カドミウム、鉛、6価クロム、ヒ素およびセレンの6項目とした。

試験を行ったコンクリートの基本配合を表-2に示す。実配合は、スランプ値が8±2cmの範囲に入るようにクリンカーアッシュの一部を石炭灰原粉に置き換えて決定した。

コンクリート試験は、フレッシュ性状確認試験として、スランプ試験と空気量の測定を行った。

試験に用いた供試体は、直径10×高さ20cmの円柱供試体とし、打込み後、65℃の蒸気養生を5時間行った後、20℃一定の水中養生を行った。なお、比較のため蒸気養生を行わず、打込み後1日間気中湿潤養生の後、20℃一定の水中養生を行った供試体も作成した。

また、硬化性状としては、圧縮強度測定とX線回折分析、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察およ

表-3 クリンカーアッシュの物理試験結果

試験項目	物性値
粗粒率 (%)	3.39
絶乾密度 (g/cm ³)	2.02
吸水率 (%)	7.30
単位容積質量 (kg/l)	1.216
実積率 (%)	58.49

表-2 コンクリートの基本配合

配合名	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	クリンカー アッシュ	粗骨材
CA0	4.6	4.7	160	348	856	0	991
CA30			160	348	613	219	1011
CA50			160	348	438	366	1011
CA80			160	348	175	585	1011
CA100			160	348	0	731	1011

表-4 クリンカーアッシュの化学分析結果

試験項目	強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
試験結果	0.60	56.9	25.2	9.0	3.9	0.6	0.3	0.1

単位 : %

び有害金属の溶出試験を行った。圧縮強度試験を行った材齢は、蒸気養生を行ったものは、5時間、7日、14日および28日とし、標準養生を行ったものは、7日および28日とした。

なお、X線回折分析の分析条件は、管電圧40kV、管電流40mAとした。走査型電子顕微鏡（SEM）

観察用試料は、炭素および金を蒸着した。観察時における加速電圧は15kV、照射電流 5×10^{-8} mAとした。

3. 試験結果と考察

3.1 クリンカーアッシュの性状

クリンカーアッシュの物理試験結果を表-3に、化学分析結果を表-4に示す。

密度は、細骨材のJISの基準値より小さく、吸水率は、大きくなっていった。これは、クリンカーアッシュの粒子の中には、多孔質なものが多く含まれているためと考えられる。

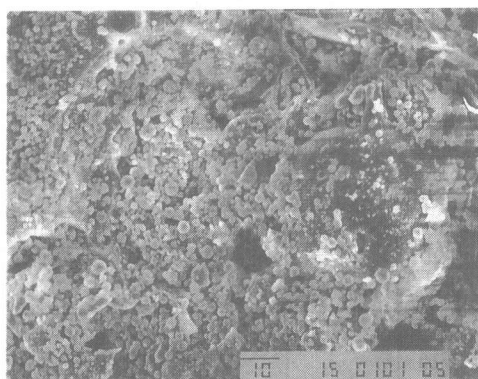
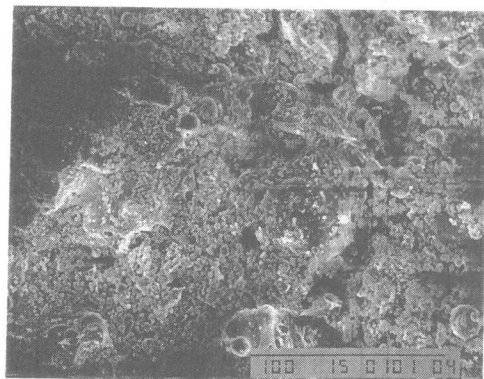
X線回折分析の結果から、主な構成鉱物は、石英とムライトであった。

また、クリンカーアッシュの走査型電子顕微鏡（SEM）観察結果を写真-2に示す。

クリンカーアッシュは、比較的緻密な部分と多孔質な部分が観察された。どちらの部分にもその表面には、直径 $10 \sim 1 \mu\text{m}$ 程度の微細な球状

表-5 クリンカーアッシュの金属類含有量と溶出試験結果の一覧

	含有量 (mg/kg)	溶出量 (mg/l)	土壌環境基準値 (mg/l)
総水銀	0.027	<0.0005	<0.0005
カドミウム	<0.1	<0.005	<0.01
鉛	24.6	<0.01	<0.01
六価クロム	<0.5	<0.01	<0.05
ヒ素	<0.5	<0.01	<0.01
セレン	2.1	0.04	<0.01



撮影倍率：500倍

倍撮影倍率：1000倍

写真-2 クリンカーアッシュの走査型電子顕微鏡（SEM）写真

粒子が付着していた。

表-5に金属類の含有量試験と溶出試験結果の一覧を示す。

溶出試験結果では、どの項目においても土壤環境基準の値を下回っていた。このことから、今回使用したクリンカーアッシュでは、有効利用による環境負荷への影響は小さいものと考えられる。しかし、クリンカーアッシュの品質変動の範囲は明らかになっていないため、使用に当たっては、溶出試験による安全性の確認が必要になると考えられる。

表-7 蒸気養生を行った供試体の圧縮強度の一覧

配合名	材 齢			
	5時間	7日	14日	28日
CA0	14.0	32.7	35.7	39.9
CA30F15	9.5	29.9	33.6	38.9
CA50F20	11.2	33.2	36.6	42.4
CA80F20	9.2	28.6	34.5	38.5
CA100F20	10.1	31.2	33.1	41.3

単位：N/mm²

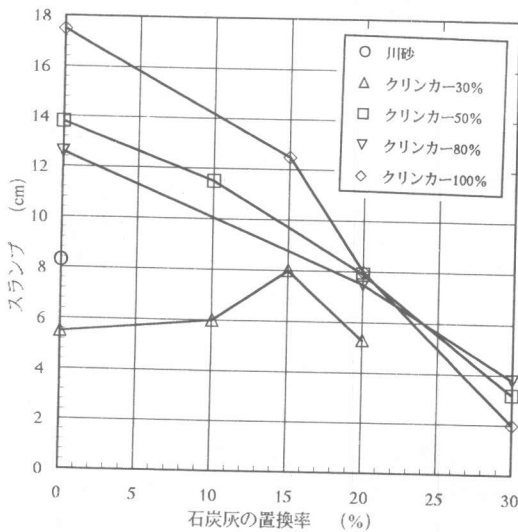


図-2 石炭灰原粉の置換率とスランプの関係

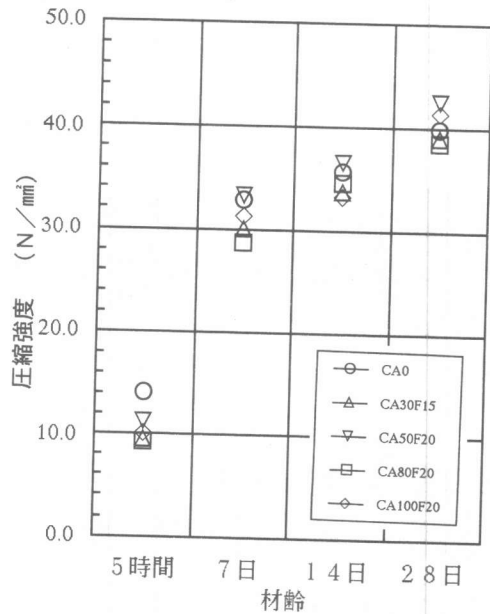


図-3 蒸気養生を行った供試体の材齢と圧縮強度の関係

表-6 コンクリートの配合

配合名	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水	セメント	細骨材	クリンカー アッシュ	石炭灰 原粉	粗骨材	混和剤
CA0			160	348	856	0	0	991	3.48
CA30F15			160	348	613	187	33	1011	3.81
CA50F20	4.6	4.7	160	348	438	293	73	1011	4.65
CA80F20			160	348	175	468	117	1011	4.65
CA100F20			160	348	0	585	146	1011	4.94

3.2 クリンカーアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状

基本配合に基づいて配合試験を行った結果、細骨材をクリンカーアッシュで置換した場合、スランプが目標の範囲に入らなかったため、クリンカーアッシュの一部を石炭灰原粉に置き換えることにした。

石炭灰原粉の置換率とスランプの関係を図-2に示す。この結果から、供試体を作製するコンクリートの配合を目標スランプの範囲に入るように変更した。その配合を表-6に示す。

クリンカーアッシュの置換率が、50%より大きい場合、クリンカーアッシュの一部を石炭灰原粉に置換するにしたがってスランプは小さくなるのに対して、クリンカーアッシュの置換率が30%の場合は、スランプが最大となる石炭灰原粉の置換率が現れた。この原因については、明らかでないが、クリンカーアッシュの粒度分布が最適な分布に近くなったためと考えられる。

3.3 クリンカーアッシュを用いたコンクリートの硬化性状

蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度の一例を表-7に、材齢と圧縮強度の関係を図-3に示す。

5時間強度は、コンクリート二次製品において即時脱型を行う基準となる強度であり、目標では、5 N/mm²であったが、すべての配合において目標値を大きく上回る結果となった。

また、細骨材をクリンカーアッシュに100%置換した場合においても、圧縮強度は川砂を用いた場合とほぼ同等であり、クリンカーアッシュ

表-8 標準養生を行った供試体の圧縮強度の一覧

配合名	材 齢	
	7日	28日
CA0	49.8	60.9
CA30F15	44.3	56.8
CA50F20	45.0	56.7
CA80F20	40.3	54.1
CA100F20	38.9	52.1

単位：N/mm²

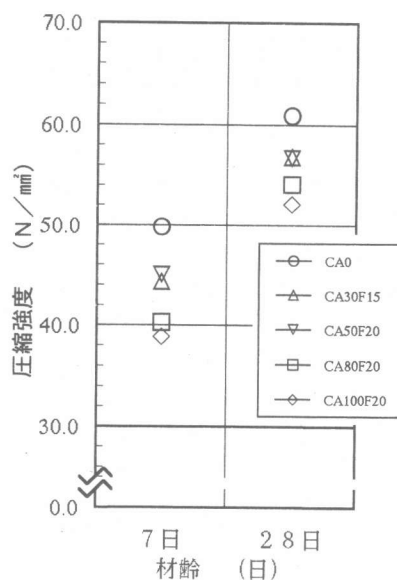
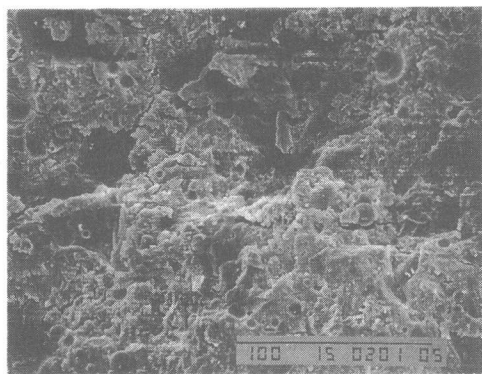
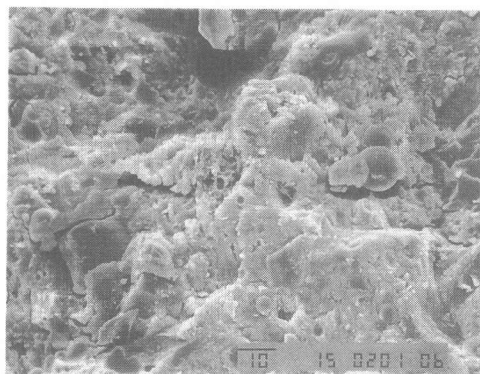


図-4 標準養生を行った供試体の材齢と圧縮強度の関係



撮影倍率：500倍



倍撮影倍率：1000倍

写真-3 クリンカーアッシュを用いたコンクリートの走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真

表-9 クリンカーアッシュを用いたコンクリートの溶出試験結果の一覧

	溶出量
総水銀	<0.0005
カドミウム	<0.005
鉛	<0.01
六価クロム	<0.01
ヒ素	<0.01
セレン	<0.01
銅	<0.01
亜鉛	<0.03

単位:mg/l

れる。

X線回折分析結果では、川砂を用いたコンクリートとクリンカーアッシュを用いたコンクリートでは、水酸化カルシウムのピーク高さ以外にはほとんど差は見られなかった。

硬化コンクリートの走査型電子顕微鏡(SEM)観察結果を写真-3に示す。

クリンカーアッシュを用いたコンクリートでは、普通のコンクリートによく見られるような水酸化カルシウムの板状結晶は確認されなかったが、フライアッシュの球状粒子がよく見られ緻密な水和物を形成している様子が確認された。

このことから、クリンカーアッシュは、セメントの水和には大きな影響を与えることはなく、強度の点からは細骨材に問題なく使用できるものと考えられる。

クリンカーアッシュを用いた供試体の溶出試験結果の一覧を表-9に示す。

重金属類の溶出は、土壤環境基準をすべて満足するものであり、クリンカーアッシュをコンクリート二次製品の細骨材として用いても環境汚染の問題は生じないことが考えられる。

4. まとめ

クリンカーアッシュの有効利用の一つとしてコンクリート二次製品用細骨材への適用を検討した結果、以下の事象が明らかとなった。

- 1) クリンカーアッシュを細骨材として使用すると、スランブが大きくなる場合がある。この対

策としてクリンカーアッシュの一部をフライアッシュで置換することにより所定のスランブ値を得ることが可能である。この場合の置換率は、今回試験を行った範囲では15~20%程度であった。

- 2) クリンカーアッシュを細骨材として用いてもコンクリートの圧縮強度は、川砂を使用したコンクリートと同程度であった。
- 3) クリンカーアッシュは、重金属の含有、溶出とも基準値以下であり、有効利用することによる環境汚染への影響は小さい。

今後は、さらにクリンカーアッシュの品質変動の確認、クリンカーアッシュを用いたコンクリートの耐久性試験、配合の異なる場合のコンクリート性状などを把握し、クリンカーアッシュの細骨材への適用性の検討を進めていきたい。

謝辞:試験を実施するに当たり、試料の提供をいただいた中国電力の関係各位感謝いたします。

参考文献

- 1) 川村満紀、鳥居和之、五十嵐心一、榎場重正: 炉底灰のコンクリート用細骨材としての適用性、セメント技術年報、Vol.38、pp.53~56、1984年