

論文 石炭灰を用いた人工骨材の製造方法に関する研究

石川 寛範^{*1}・藤木 英一^{*2}・田中 公德^{*3}・和美 廣喜^{*4}

要旨: 石炭灰を主原料とした人工骨材を開発するに当たり、既存の方法(製造設備、焼成温度)を活用することを前提として、人工軽量骨材の原料である頁岩微粉末と混合して粒子密度 1.5 g/cm^3 で、天然骨材と比べて高吸水型の人工骨材を開発した。試作した骨材は、圧壊荷重が既存人工軽量骨材の約2倍の1000Nを有し、高強度の軽量コンクリート用骨材としての活用が期待される。

キーワード: 石炭灰, 頁岩微粉末, 人工骨材, 軽量, 高強度, 高吸水率, 実機製造

1. はじめに

1.1 開発の背景

現在火力発電所から排出される石炭灰の発生量は年間約 500 万トンにのぼるが、電力需要の増大に伴う石炭火力発電所の増設計画から 10 年後には約 700 万トンに増大することが予測されている。石炭灰の有効利用状況はセメント原料、コンクリート用混和材、土質改良材などへの利用が図られている。しかし、有効利用率は約 70%程度に止まっている。残りは最終処分場での埋め立て処理がされているが、最終処分場の逼迫などと相まって、地球的な環境対策、未利用資源の有効活用対策の実施が望まれている。

石炭灰のコンクリート分野での利用としては、フライアッシュを大量使用したコンクリートに関する研究開発が行われており、新たな有効利用技術として期待されている。また、石炭灰のコンクリート用人工骨材の原料としての利用も有効な手段の一つである。従来から石炭灰を原材料とした人工骨材の例としては、国内炭の灰のみを使用し石炭微粉末を加えて焼成した発泡型人工軽量骨材がある。¹⁾また、最近では石炭灰、ベントナイト、石灰石微粉末などを原料とした非発泡型

の絶乾密度 $1.8 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$ 程度の骨材²⁾などが試作され、実用化が目指されている。

本報は、有効利用量の少ないJIS規格外の石炭灰の活用を前提に頁岩微粉末を混合、造粒して焼成した石炭灰人工骨材の製造方法に関するものである。

1.2 開発の目標

石炭灰を活用した新しい骨材を開発するにあたり、その開発目標を以下のように計画した。

- 1) 既存の人工軽量骨材製造設備による製造が可能で、低品質の石炭灰を多量に活用できること。
- 2) 新しい骨材を使用したコンクリートの単位容積質量が 2.0 kg/l 以下の軽量性を可能とする骨材の密度(絶乾密度で約 1.8 g/cm^3 以下)を有すること
- 3) コンクリートの圧縮強度 80 N/mm^2 程度までが可能な骨材強度(圧壊荷重1000N以上)を有すること。
- 4) 使用時の骨材に一定の含水率(15%程度以上)を付与でき、これによる自己養生機能が期待できる高吸水型骨材であること。

*1 日本メサライト工業(株)技術部技術課(正会員)

*2 日本メサライト工業(株)技術部部長(正会員)

*3 日本メサライト工業(株)技術部技術開発課課長

*4 鹿島建設(株)技術研究所企画管理室担当部長 博士(工学) (正会員)

2. 材料

2.1 頁岩微粉末

使用した頁岩微粉末は千葉県安房郡産であり、人工軽量細骨材原料用に粉碎されたものをさらに微粉碎して用いた。表-1に頁岩微粉末の組成分析例を示す。また、図-1にその粒度分布及び粒径加積曲線を示す。

表-1 頁岩微粉末の化学成分

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	強熱減量 (%)
69.3	13.1	2.29	1.91	1.60	1.62	1.31	2.37	5.58

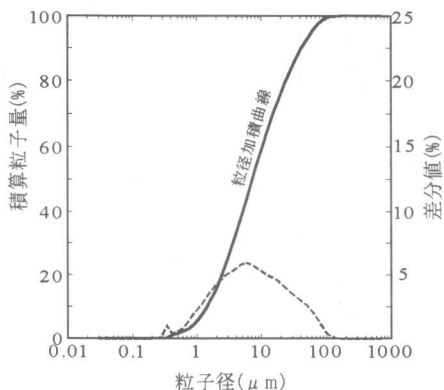


図-1 膨張性頁岩の粒度分布

2.2 石炭灰

石炭灰は常磐共同火力(株)勿来発電所から副産されたものを使用した。化学成分を表-2に示す。また、その粒度分布及び粒径加積曲線を図-2に示す。

2.3 粘結剤

粘結剤としてベントナイト及び特殊増粘剤を使用した。

3. 原料配合の決定

3.1 人工骨材の原料配合試験

前述した開発目標に最適な人工骨材の原料

表-2 石炭灰の化学成分

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	強熱減量 (%)
53.9	28.8	3.23	1.21	0.95	3.44	0.58	0.39	4.70

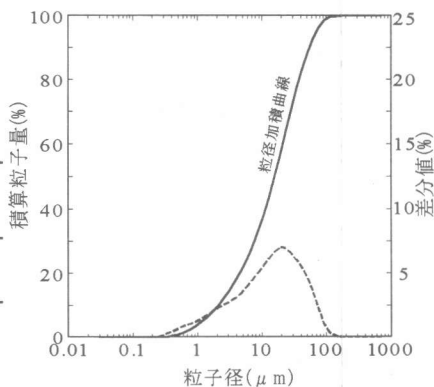


図-2 石炭灰の粒度分布

配合を決定するため、石炭灰の原料配合割合を10%ずつ変化させて、直径13mm程度の球状に造粒した。焼成は写真-1に示す電気炉を用いた。焼成時の温度条件を図-3に示す。温度条件は頁岩単体をロータリーキルン実機にて焼成した場合と骨材粒子密度が同等となる様に設定した。焼成した骨材の絶対乾密度、24時間吸水率をJIS A 1135「構造用軽量粗骨材の密度及び吸水率測定方法」に準じて測定した。また、圧壊荷重はJIS Z 8841「造粒物-強度試験方法」により測定した。

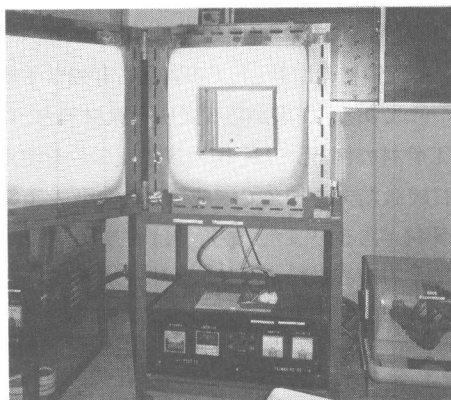


写真-1 電気炉

骨材の絶乾密度を図-4に、24時間吸水率を図-5に、圧壊荷重を図-6にそれぞれ示す。また、骨材の外観及び断面を写真-2, 3にそれぞれ示す。石炭灰混入率50%程度で絶乾密度及び圧壊荷重が最大値を示している。24時間吸水率は石炭灰の混入率の増加とともに増加する傾向を示している。同図にはそれぞれの配合割合での骨材の絶乾密度から計算した、80%飽和吸水率(使用前に骨材空隙の80%を飽和させて使用するとして)を示す。目標の吸水率は、石炭灰の配合割合として50%以上が必要である。そこで、当初の開発目標より石炭灰配合割合を70%あるいは60%に決定した。

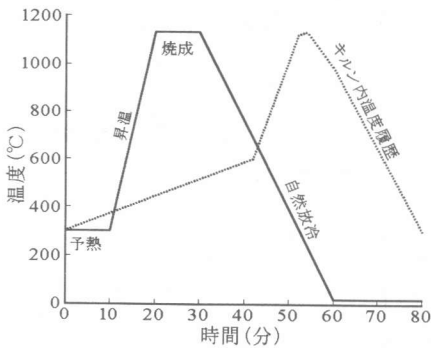


図-3 焼成温度履歴

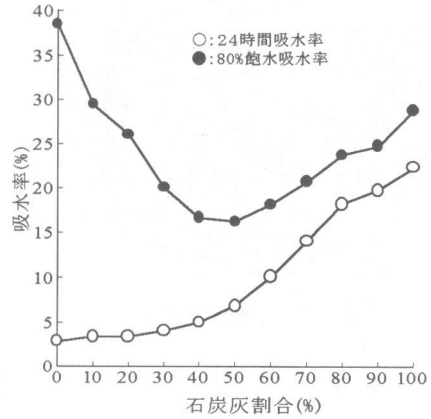


図-5 石炭灰混入率の変化による24時間吸水率の変化

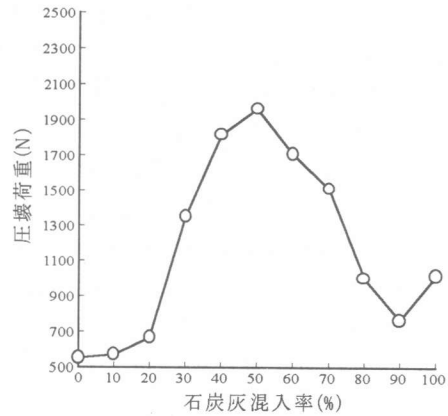


図-6 石炭灰混入率の変化による圧壊荷重の変化

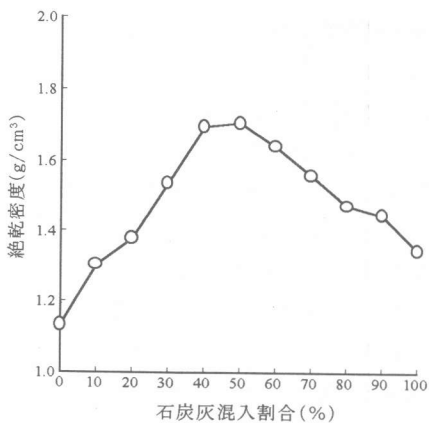


図-4 石炭灰混入率の変化による絶乾密度の変化

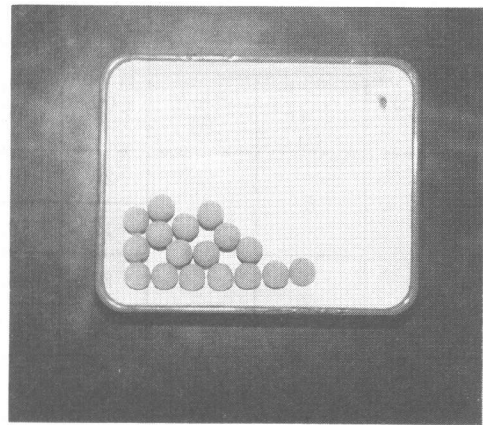


写真-2 電気炉骨材外観

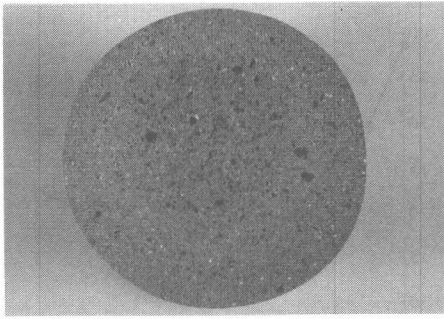


写真-3 電気炉品断面

3.2 成型試験

実機焼成に先立ち成型物の強度増加を図るためベントナイトと粘結剤の種類や混入率を変えてその強度を測定した。骨材原料に粘結剤を加えた後、含水率20%及び17%になるように加水・混練した。押出成型機により直径10mm、長さ10mm程度の円柱状に成型し、3mの高さより落下させ落下後の成型物に生じるクラックの発生率により強度を測定した。このような方法により、成型物の強度を確保するための最適な増粘剤の種類と量を求めた。表-3に粘結剤の組合せと試験結果の一部を示す。この結果より粘結剤はベントナイト5%、増粘剤0.4%の組合せで実機焼成時の成型を行うこととした。

表-3 成型強度試験結果例

No.	石炭灰混入率 (%)	粘結剤 (外割)		成型物含水率 (%)	3m落下クラック発生率 (%)
		ベントナイト (%)	増粘剤 (%)		
1	60	5	0.4	20	16.0
2				17	10.0
3		10		20	15.0
4				17	8.5

4. 実機製造

原料配合及び成型試験の結果を基に実際の人工軽量骨材製造プラントで実機製造を行った。

製造フローを図-7に示す。骨材材料を受け入れた後、含水率約20%になるよう加水・混練し、押出成型機により直径5~13mm、長さ10~15mm程度の円柱状に成型した。焼成は長さ60m、直径3.0m(焼成帯直径3.8m)のロータリーキルンにて行った。焼成温度は、キルン挿入口で、約250℃、キルン内焼成帯で約1100℃である。

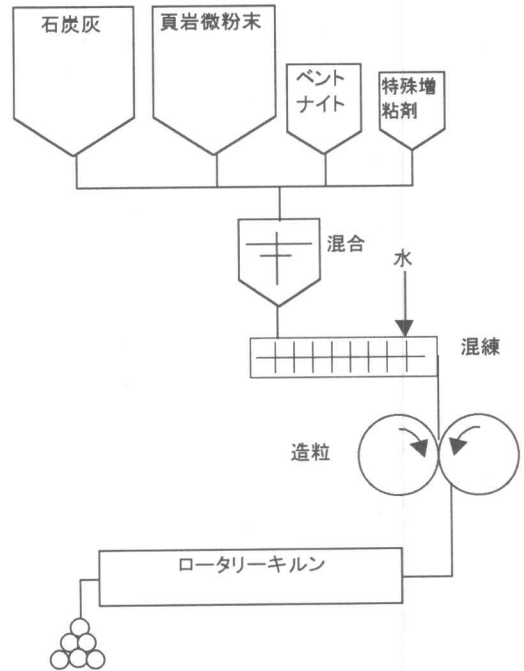


図-7 製造フロー

4.1 第1回実機焼成

第1回目の実機焼成では、石炭灰の配合割合を70%で実施した。焼成時のロータリーキルンへの挿入量は19.2ton/hで、合計52.7tonを挿入した。焼成された骨材量は、32.6tonであった。よって収率は約60%となる。収率の低下は造粒物の強度不足のためキルン内部での攪拌による摩滅粉化によるものである。焼成した骨材の物性を表-4に示す。試験方法は原料配合試験と同様であるが、圧壊荷重については、寸法10~15mmで、直径方向に加圧した。第1回目の実機焼成では、絶乾密度及び24時間吸水率は目標に達したが、圧壊荷重については

目標とした強度が得られなかった。

表-4 第1回焼成品試験結果

石炭灰混入率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	24時間吸水率 (%)	圧壊荷重 (N)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	ふるい分け試験 (通過率)				粗粒率
						20	15	10	5	
70	1.52	17.2	327	1.073	69.5	100	100	86	37	5.62

表-5 第2回焼成品試験結果

石炭灰混入率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	24時間吸水率 (%)	圧壊荷重 (N)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	ふるい分け試験 (通過率)				粗粒率
						20	15	10	5	
60	1.51	8.2	1136	1.016	67.4	100	100	84	44	5.57

4.2 第2回実機焼成

第2回目の実機試験は、第1回目の結果を受け、造粒物の強度向上のため、石炭灰配合割合を60%にして、新たに開発した粘結剤を用いた。ロータリーキルンへの挿入量は19.4ton/hで合計61.5ton挿入した。焼成した骨材量は37.0tonであったので、収率は60.2%であった。焼成した骨材の物性を表-5に示す。また、写真-4に外観を、写真-5に断面を示す。図-8に骨材内部の微細構造を確認するため水銀圧入法により測定した細孔径分布を示す。絶乾密度は第1回とほぼ同等だったが、24時間吸水率については低下した。その後のプレヴェーティングでは吸水率15~16%を確保した。圧壊荷重については大幅に増加した。総細孔量については、

111mm³/g と通常の人工軽量骨材よりも少なかった。

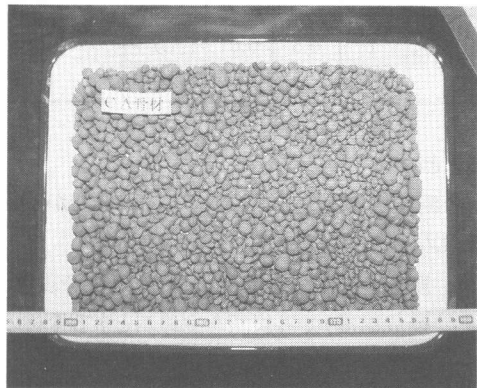


写真-4 第2回実機品外観

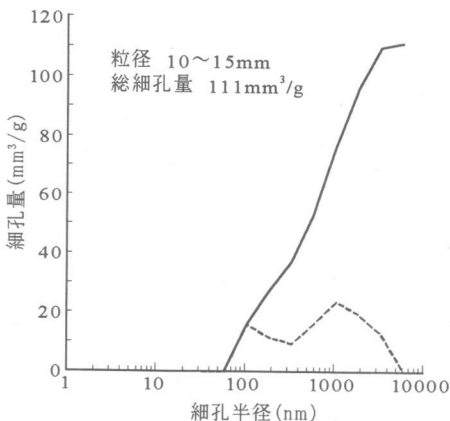


図-8 骨材細孔径分布

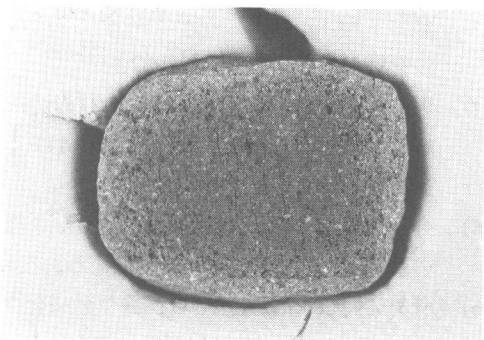


写真-5 第2回実機品断面

4.3 骨材試験結果

第2回目の実機焼成にて製造された骨材についてJIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」試験を行った。試験結果を表-6に示す。本骨材は、化学試験においてはすべての項目で適合し、物理試験結果より区分HAに適合する。また、コンクリート試験結果より区分419に相当する。よって、本骨材は人工軽量骨材HA-419に適合する骨材である。

表-6 JIS A 5002による試験結果

	化学試験			物理試験							コンクリート試験	
	強熱減量 (%)	SO ³ (%)	NaCl (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	24時間吸水率 (%)	有機不純物	粘土塊量 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	圧縮強度 (N/mm ²)
試験値	0.09	0.17	0.001	1.5	1.6	6.64	標準色より淡い	0.03	0.96	65.3	1.943	48.2
規格値	1以下	0.5以下	0.01以下	1.5以上 2.0未満	—	—	標準色より淡い	1以下	—	60以上	1.8以上 2.0未満	40以上

5.まとめ

今回の実機製造試験により以下のことが明らかになった。

- 1) 既存の人工軽量骨材製造方法(製造設備、焼成温度)で石炭灰を主原料とする骨材の製造が可能である。
- 2) 石炭灰配合割合60%で、絶乾密度1.51 g/cm³、24時間吸水率8.2%、圧壊荷重1000Nを満足する人工骨材が得られた。
- 3) 頁岩微粉末と石炭灰の配合割合で焼成後の骨材の物性をコントロールできる。
- 4) 製造された骨材は、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」の区分HA-419に適合する人工骨材である。
- 5) 今回の製造では、収率が低かったが、今後の習熟により収率は上がるものと思われる。
- 6) 骨材の特性を活かして、自己養生効果を持ったコンクリートへの活用が期待される。

参考文献

- 1) 是石俊文, 皇埜晴義, 船本憲治: フライアッシュを利用した人工軽量骨材の開発, セメント・コンクリート, No. 478, pp. 18~27, 1986. 12
- 2) 曾根徳明: 石炭灰を主原料とした高強度人工骨材, コンクリート工学, Vol. 36, No. 12, pp. 3~10, 1998. 12