

[1004] 石炭灰系低吸水量骨材とこれを用いたコンクリートの基礎的性質について

正会員 南條 毅一 (宇部興産セメント技術センター)
 正会員 ○米田 俊一 (宇部興産セメント技術センター)
 正会員 吉岡 保彦 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 米澤 敏男 (竹中工務店技術研究所)

1. まえがき

石炭火力発電ボイラーで燃焼後回収される石炭灰の有効利用の一環として、構造用人工軽量骨材(以下ALAと略記)への適用を検討し、低吸水量のALAを開発した[1][2]。石炭灰を原料とするALAの汎用品については既に市販品があり、その品質は従来の膨張頁岩を主原料とするものと比べ特に問題はないということが確認されている[3]。

試製ALAは、これらの従来品に比べて加圧吸水量が著しく少ないために、コンクリートのポンプ圧送性および凍結融解抵抗性の面のほか、強度の面においても優れた性能が期待できる。これから、本骨材は、極洋の油田開発用の海洋リグに使用する高強度軽量コンクリート用の骨材としての用途が考えられ、さらに、高層RC造ビル用などにも適用可能な骨材と考えられる。

本報告は、試製低吸水量ALAの性質およびこの骨材を用いた軽量コンクリートの基礎的性質についての実験結果をとりまとめたものである。

2. 実験概要

表-1 粗骨材(人工軽量骨材)の種類と概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材には海砂(比重2.54、F.M.2.65)および川砂(比重2.61、F.M.2.80)を用いた。

記号	主原料	焼成方式	粒形	JISA5002	備考
FA-A	石炭灰	ロータリーキルン	造粒型	適合	低吸水量試製品
FA-B		連続自然	造粒型	適合	市販品
ES-A	膨張頁岩	ロータリーキルン	非造粒型	適合	市販品
ES-B			造粒型	適合	現在、生産休止

本試験に用いた粗骨材(ALA)の種類と概要は表-1の通りであり、その物理的性質を表-2に示す。汎用強度レベルのAEコンクリートにはレジン系AE剤を用い、高強度コンクリートの凍結融解試験には、高縮合トリアジン系化合物および高縮合芳香族スルホン酸塩の高性能減水剤と付属のAE剤の組み合わせの化学混和剤を用いた。

表-2 粗骨材の物理的性質

種類	絶乾比重	24時間吸水率(%)	単位容積重量(kg/L)	実積率(%)	圧潰強度(kg)	40t破砕値(%)	浮粒率(%)	粗粒率
FA-A	1.32	2.1	0.81	61.8	45	49	0.0	6.39
FA-B	1.38	15.0	0.84	60.8	35	40	0.0	6.45
ES-A	1.25	9.5	0.80	64.0	54	35	0.8	6.40
ES-B	1.24	6.7	0.80	64.6	73	35	0.5	6.42

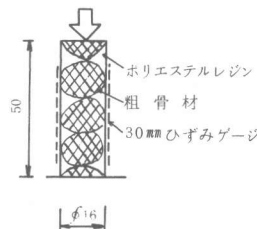
注) 単位容積重量はゾーピング法、圧潰強度はJISM8718鉄鉱石類(ペレット)の圧潰強度測定法による。

2.2 試験方法の概要

(1) ALAの基礎的性質

粗骨材強度に関する基礎的試験のうち、破砕値はB.S.812によった。圧潰試験は表-2脚注に示すようにペレットの強度に関するJIS規格を適用し、φ10~φ13mmの粒子の圧潰荷重(50試料の平均)を求めた。

粗骨材のヤング率は図-1に示すように



骨材種類	ヤング率 (10 ⁴ kg/cm ²)
レジンのみ	1.7
FA-A	4.0
ES-A	4.4
ES-B	4.5

図-1 骨材の変形性(みかけのヤング率)に関する実験

φ15mm前後の粒子を樹脂で固め、電気抵抗線ひずみゲージによる応力ひずみ曲線の初期勾配の値を試験値（3試料の平均）とした。骨材の微構造の検討のために、骨材表面の走査型電子顕微鏡観察および細孔径分布の測定（試料：φ5mm程度の非破碎粒子）を行った。また、骨材散水試験試料の調整において、常圧散水試験試料は絶乾骨材を常温中で所定期間散水することにより、一方、加熱骨材散水試験では絶乾骨材を所定温度で30分間加熱した後、10分間水中に投入することによって吸水率試験（JIS A 1135）の試料とした。加圧吸水試験の装置には内容積2.1ℓの加圧ブリージング容器を用い、カサ容積500mlの試料の一定加圧力下（試験水準：10～40kg/cm²）および除圧後の含水量を求めた。なお、吸水量はプランジャーの変位測定値から算出し、所定の圧力値までの载荷に要する時間および除圧時間は1分間とした。

(2) コンクリートの物性試験

表-3 各種コンクリート物性試験の試験条件

通常の試験はJIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」に準じた。圧縮強度試験供試体はφ10×20cmとし、静弾性係数は検長10cmのコンプレッソメーターによった（3試料の平均）。

試験名称	供試体 (cm)	試験条件 (⇒ 試験開始, [] 試験方法)
乾燥収縮	10x10x40	20°C水中 (1週) → 20°C、湿度60% [コタケゲージ法]
クリープ	φ15x30	20°C水中 (4週) → 20°C、湿度60% (1週) → 載荷 (150kg/cm ²) ⇒ [コタケゲージ法]
中性化促進	10x10x40	20°C水中 (2週) → 20°C、湿度60% (2週) → 2側面以外の面はすべて被覆 → 30°C、湿度60%、CO ₂ 濃度5% ⇒ [1%フェノールナフタレン塗布法]
凍結融解	10x10x40	20°C水中 (2週) ⇒ [ASTM C666 A法]

乾燥収縮、クリープ、中性化促進および凍結融解試験の試験条件の概要をまとめて表-3に示す（供試体数は1種類あたり2個）。

3. 実験結果および考察

3.1 粗骨材の性質

(1) 骨材の微構造について

図-2に粗骨材粒子表面部の細孔径分布を水銀加圧方法によって測定した結果を示す。これから、非造粒型のALAは1μm以上の細孔が多いのに対して造粒型のALAは1μm以

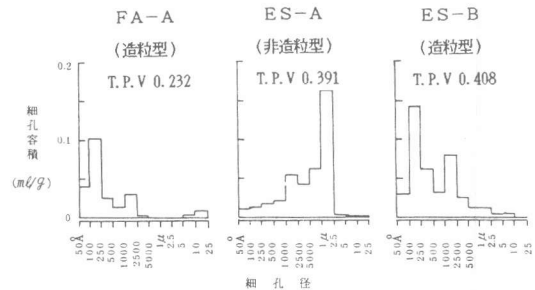


図-2 粗骨材の細孔径分布

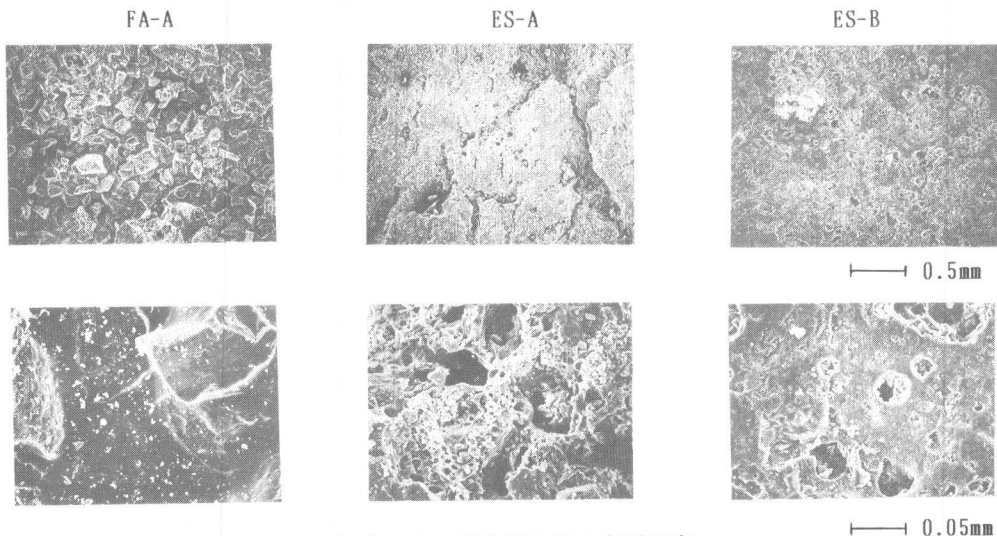


写真-1 粗骨材粒子の表面写真

下の細孔が占める割合が多いのがわかる。試製品FA-Aの全細孔量が最も小さいが、これは試製品の吸水率が小さいことに関連している。骨材の吸水率はその微構造と密接な関係があるのでALAの表面を走査型電子顕微鏡で観察した。その結果を写真-1に示す。市場品の粒子表面には多数の小開孔部が存在しており、非造粒型のES-Aには大きな亀裂状の凹部も観察される。これらに対し試製品FA-Aはその表面に製造工程上用いる微細粒子が多数融着し、同じ造粒型のES-Bの表面が比較的滑らかであることと様相を異にしている。試製品表面をさらに微細に観察すれば、所々に小開孔部が存在するものの大部分がガラス状の表面であることがわかる。

(2) 骨材強度について

骨材強度を表わす指標として圧潰強度および40t破砕値を求めた(表-2)。この結果からは石炭灰を原料とするALAの骨材単独の強度は膨張頁岩系のALAよりも若干小さい傾向がみられる。試製品FA-Aの製造実験データ[4]によれば、同一原料の骨材の圧潰強度および40t破砕値はそれぞれ絶乾比重と密接な関係がある。膨張頁岩系ALAの絶乾比重が石炭灰系ALAのそれより小さいのに骨材強度が逆に高い理由は骨材内部の気孔分布および気孔形状に関係するものと思われる。

骨材の変形性に関し、図-1にみかけのヤング率の試験結果を示す。これからFA-Aは変形性が若干高く、これも骨材粒子の内部構造の差異によるものと推察される。

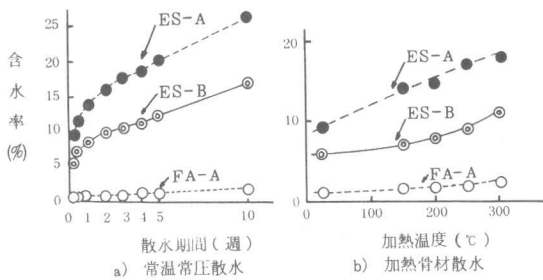


図-3 散水による含水率の増加

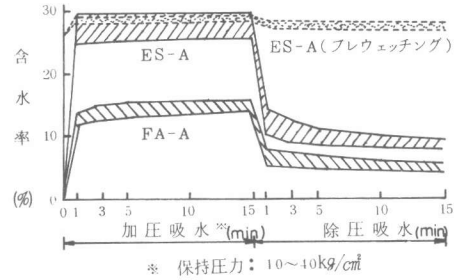


図-4 圧力吸水試験結果の一例

(3) 吸水性について

表-2に示すように本試験でとりあげたALAの24時間吸水率は、FA-B、ES-A、ES-B、FA-Aの順に小さく、FA-Aの吸水が非常に小さい。

軽量コンクリートの製造ならびに施工時の不安定な骨材吸水を防止するために散水(プレウエッチング)を行う場合があるが、これに関し、常圧散水による含水率の増加の状態を図-3a)に示す。24時間吸水率の大きい骨材ほど散水時間1週目までの吸水が急速で、その後含水率は徐々に増加し、全期間を通じて含水率の増加が大きいことがわかる。常温常圧散水方法では必要十分な含水率に調整するのに時間を要するため、市場品では、クーラーから排出されたばかりの熱い焼成物に直接散水するホット散水法が行われている。加熱骨材に散水した場合の含水率は図-3b)の通りであり、骨材の加熱温度を高くすると含水率が大きくなる傾向が認められるが、高温域における骨材加熱は骨材の圧潰強度に影響する(FA-Aの場合、250℃以下が適当)。FA-Aは骨材の加熱の有無にかかわらず常圧では含水率の増加がほとんどみられないのが特徴である。

図-4は軽量コンクリートのポンプ施工を想定し、ALAの圧力吸水性状を測定したものである。

乾燥骨材と含水骨材とでは圧力下の吸水量が異なるという説[5]があるが、本試験では非造粒型のES-Aが示すように圧力下の含水量は試験前の含水率にあまり影響を受けず、一定の値になるようである。常圧下では吸水の増加が見られなかったFA-Aも加圧力下では14~16%の吸水があり、

また、除圧によって約10%の水を放出することがわかった。この放水現象はポンプ圧送後のコンクリート品質に悪影響を与えるので、この放水量は小さいほど好ましく、図中のES-Aのプレウエッチングの場合のように加圧吸水から除圧放水に至る間の含水量変化が少ないものが望まれる。ところで、後述のように凍結融解抵抗性に関しては除圧後の含水率が5%を越える骨材を用いたコンクリートの耐久性は著しく劣るので、優れた低吸水性を示すFA-A（除圧後含水率4~6%）についても使用環境条件によっては圧力下の吸水特性を更に改善する必要がある。

なお、絶乾状態の造粒型骨材ES-Bの加圧吸水量および除圧後の含水量は非造粒型骨材ES-Aとほぼ同じ値であった。（図示省略）

3.2 コンクリートの基礎的性質

(1) 単位水量

単位水量とスランプの関係の一例を図-5に示す。これによるとFA-Aを用いた場合には同じ造粒型のES-Bに比べ、硬練りコンクリートで約7 L/m^3 、軟練りコンクリートで2~3 L/m^3 単位水量が増加するが、日本建築学会[6]の軽量コンクリート1種(AE)の単位水量の標準値に比較的近い。写真-1にみられるようにFA-Aの表面テクスチャーが水量増加と関係していると思われる。

(2) 圧縮強度

水セメント比が60~40%の範囲のAEコンクリートの強度とセメント空けき比の関係を図-6に示す。ここで空けきは単位水量と空気量との合計容積としたが、図示のごとくセメント空けき比と圧縮強度との間には直線関係がある。図中右端の値はJIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」の試験条件になるブレンコンクリートの値であるが、同一直線上に位置するようである。本試験の範囲では骨材間の強度の差は、FA-Aが若干高強度のようであるが明瞭でなく、また、本試験に用いたALAは各種骨材を用いた既往の試験結果[7]と比べ、高強度の部類に属するようである。

図-7には水セメント比30%ブレンコンクリートの強度発現性を示す。前述の場合と異なり、低水セメント比では骨材間の強度差が明瞭となり、FA-Aを用いた場合に非常に高い圧縮強度が得られた。ところで、骨材自体の強度はES-BよりもFA-Aの方が低く、コンクリート強度と矛盾している。この原因として骨材の含水量の相違が考えられるので、材令4週以降供試体を乾燥条件下に存置してみたが、図示のようにFA-Aの強度増進も大きく両骨材の差は縮小しなかった。

FA-Aが高強度を発揮する理由のひとつには、FA-Aの表面観察写真から推察されるように、この骨材の付着性能が優れていることが挙げられよう。

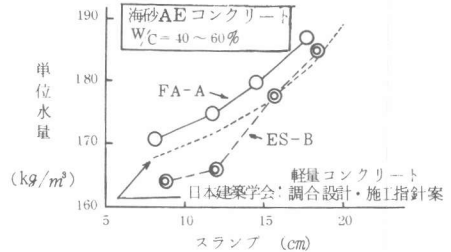


図-5 単位水量とスランプの関係の一例

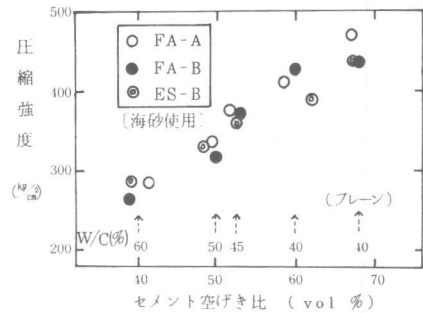


図-6 軽量AEコンクリートの圧縮強度(28日)

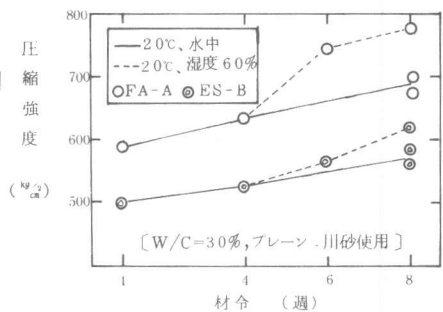


図-7 高強度軽量コンクリートの強度発現特性

(3) 静弾性係数

試験結果を図-8に示すように、静弾性係数はその圧縮強度と相当に密接な関係がある。また、軽量コンクリートの弾性係数はその単位重量とも関係し、これらの因子を織り込んだACI 規準式が推定式としてよく用いられている。本試験におけるコンクリートの単位重量は約 1.8~1.9 であり、これからFA-Aを用いた場合にはACI 式でかなり精度よく推定できるが、FA-BおよびES-Bの場合の弾性係数はFA-Aより $0.2\sim 0.3 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 小さく、実際の単位重量よりも小さい値を用いなければ良好な推定ができない。

FA-Aは図-1に示すように他の骨材よりもみかけのヤング率は小さく、圧縮強度の場合と同様に弾性係数についても骨材自体の特性とコンクリートの物性が逆転した関係になっている。FA-A以外の骨材はコンクリート中でかなり吸水しているため、含水による骨材自体の変形特性の変化等が予想されるが、これらの影響については今後の検討を要す。

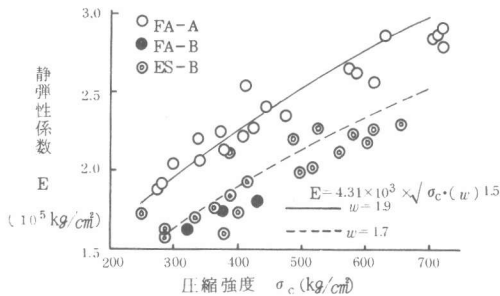


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

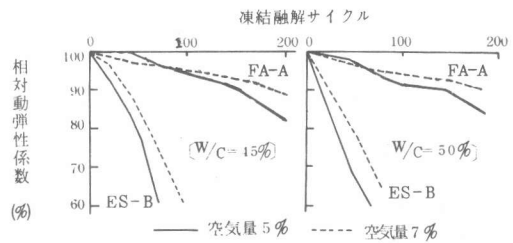


図-9 凍結融解抵抗性試験結果
〔24時間吸水粗骨材、海砂、AE 剤使用の場合〕

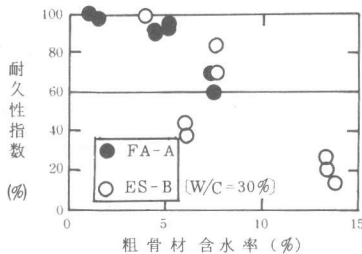


図-10 高強度軽量コンクリートの耐久性(200サイクル)
〔川砂、高性能減水剤、AE 剤使用の場合〕

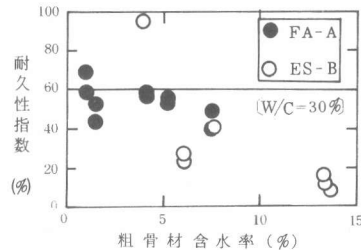


図-11 高強度軽量コンクリートの耐久性(300サイクル)
〔川砂、高性能減水剤、AE 剤使用の場合〕

(4) 凍結融解抵抗性

一般に、軽量コンクリートの凍結融解抵抗性は普通コンクリートと比べて若干劣るといわれており、その原因はALA 中の大粒部分の強度が小さいことと吸水が大きいために考えられている。凍結融解抵抗性を向上させる方法として、AE剤を用いることおよび気乾のALA を用いることが有効であるとの試験結果もあるが、図-9に示すように本試験の結果では、比較的吸水量の少ないES-B(吸水率10%以下)を用いたAEコンクリートについても、その耐久性はかなり低く、一方、吸水率約2%のFA-Aを用いた場合には、かなり耐久性を改善することができるようである。

図-10、図-11に水セメント比30%の高強度軽量コンクリートの凍結融解抵抗性に関する試験結果を示すように(図中記号は1供試体と対応)、単なる高強度化(FA-A:約720kg/cm²、ES-B:約600kg/cm²)だけでは耐久性の向上は難しく、耐久性はALAの含水量に大きく影響されるようである。本試験結果では、ALAの含水率を5%以下にすれば繰返し数200サイクルまで十分

な抵抗性が期待できるものの、繰り返し数 300 サイクルでは低吸水性のFA-Aを低い含水状態で用いてもかなりの耐久性の低下はまぬがれないようであるが、この点については適正空気量、適正空気泡分布等についての今後の詳細な検討を要す。なお、本実験に用いたFA-Aは通常の方法では含水率を高めることが困難であるので、真空吸引処理によって含水量を所定の値に調整した。

(5) 乾燥収縮、クリープおよび中性化促進試験結果

表-4に結果を示すように本実験の範囲ではFA-AとES-Bの間に差はみられないようである。

4. 結論

従来の人工軽量骨材に比べて著しく小さい吸水率を示す石炭灰系軽量粗骨材の性質とこれを用いたコンクリートの基礎的物性を2、3の在来品の場合と比較検討した。この結果、

(1) 試製骨材の微構造は、表面殻部が非常に緻密で、在来品のように亀裂状の凹部および小開孔部が少ないことが特徴であり、これが吸水率が小さいことと関連している。

(2) 試製骨材の表面には微細粒子が融着しているので、ザラザラしたテクスチャーを有する。このためコンクリートの単位水量が若干増加するが、モルタルマトリックスとの付着特性が優れているようであり、低水セメント比において非常に高い圧縮強度が得られる。

(3) 骨材自体の強度およびみかけのヤング率は試製品が最も小さいが、コンクリートとしての強度および静弾性係数は逆に高い値を示す。

(4) 凍結融解抵抗性は粗骨材の含水量の影響が大きく、本実験の範囲では、繰り返し回数 200 サイクル程度までは含水量 5% 以下の骨材の使用が有効であり、繰り返し回数が 300 サイクルになると極度に低い含水量においても耐久性の低下がみられたが、これについては今後更に究明する必要がある。

このように画期的な低吸水性が特徴の試製品ではあるが、プレウエッチング性、ポンプ施工性あるいは圧送後のコンクリートの凍結融解抵抗性等の面については、今後、現場施工実験等を含む総合的検討が必要であると思われる。

[参考文献]

[1] 小林和一、明木精治、岩田和公：人工軽量骨材の製造方法、特許出願、昭60-5257
 [2] 小林和一、臼井皓司、岩田和公：低吸水性人工軽量骨材の製造方法、特許出願、昭61-31489
 [3] 向井毅、菊地雅史、小室真一：石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する検討、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、p.p.249 ~252、1986
 [4] 小林和一、et al：石炭灰の有効利用の研究（第8報）、宇部興産中央研究所報告 p.p.186 ~188、1983、6月（未発表）
 [5] 横山昌寛：人工軽量骨材の吸水特性に関する研究、材料22巻、第232号、p.49、1973
 [6] 日本建築学会：軽量コンクリート調合設計・施工指針案・同解説、p.106、1978
 [7] 例えば西沢紀昭、奥島正一、岸谷孝一、山崎寛司：人工軽量骨材コンクリートの性質、コンクリートジャーナルVol.4、No.12、p.21、1966

表-4 乾燥収縮、クリープおよび中性化促進試験結果

骨材種類	w/c	乾燥収縮			クリープ		中性化促進	
		材令 (日)	長さ変化 (10 ⁻⁴)	重量変化 (%)	材令 (日)	ひずみ (10 ⁻⁴)	材令 (日)	中性化深さ (mm)
FA-A	40	170	6.5	2.40	200	7.9	56	3.4
	55		8.0	3.77		13.5		9.6
ES-B	40		7.2	3.66		8.3		3.7
	55		8.9	5.37		14.8		11.6