

論文 石炭灰を原料とした人工骨材コンクリートの諸特性に関する検討

小谷中昭裕*¹・高倉光明*²・志水修身*³・大神剛章*⁴

要旨：石炭灰を原料とした人工骨材を試製し、この骨材を用いたコンクリートの諸特性について検討した。その結果、碎石を用いたコンクリートと比較して、所要のスランプを得るための単位水量を減少でき、セメント水比が同一の場合にも大略同等の強度発現性を示すことが確認された。本骨材を使用すれば、圧縮強度600kgf/cm²程度までの範囲において単位容積質量2.0t/m³程度の軽量コンクリートを得ることが示された。

[キーワード：石炭灰、人工骨材、フレッシュコンクリート、強度特性]

1. まえがき

近年、電力需要の増加およびエネルギー事情の変化により石炭火力発電所が増設される傾向にある。これに伴い、発電所から発生する石炭灰は21世紀初頭には 800万t 程度に増大すると予想されている[1]。したがって、石炭灰の有効大量利用方法の検討は今後の重要課題に挙げられており、この方法の一つにコンクリート用骨材への活用を挙げることができる。石炭灰を原料とした発泡型の人工軽量骨材については従来より検討され、一部実用に供されているが、緻密な骨材に関する報告は少ない。

本報告は石炭灰を原料とし、比重が 2.0程度の緻密な粗骨材を試製し、また、これを用いたコンクリートの諸特性について、従来の碎石コンクリートと比較検討を行ったものである。

2. 実験の概要

2. 1 使用材料

(1) セメント

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

(2) 骨材

コンクリートに用いた粗骨材は、石炭灰を原料とした、比重の相異なる 2種類の人工骨材（以下、CA骨材と呼ぶ、記号、CA-A, CA-B）であり、また、比較のために碎石も使用した。なお、いずれのコンクリートの場合にも細骨材には陸砂（表乾比重2.59, 吸水率1.48%, 粗粒率2.75）を用いた。骨材は充分吸水させたものを表乾状態として用いた。

(3) 混和剤

混和剤にはリグニンスルホン酸系のAE減水剤（標準形）およびAE助剤も併用した。

2. 2 配合

試験に用いた配合は単位セメント量260kg/m³, 300kg/m³ および 380kg/m³ とし、スランプおよ

* 1 秩父小野田（株） 資源リサイクル研究所（正会員）

* 2 電源開発（株） 火力部

* 3 （株）電発コール・テック 資源事業部

* 4 秩父小野田（株） 資源リサイクル研究所

表-1 粗骨材の試験項目

試験項目	試験方法
比重	JIS A 1110
単位容積質量	JIS A 1104
安定性	JIS A 1122
すりへり減量	JIS A 1121
破砕値	BS 812

表-3 石炭灰の特性

比重	比表面積 (cm^2/g)	化学成分(%)						
		ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
2.08	3040	1.6	63.3	27.7	3.3	0.1	0.7	0.7

表-4 CA骨材の化学成分

骨材種	化学成分(%)						
	free CaO	ig. loss	SO ₃	NaCl	Na ₂ O	K ₂ O	FeO
CA-A	0.0	0.1	0.05	0.005	0.32	0.40	1.07
CA-B	0.0	0.1	0.03	0.006	0.30	0.40	0.93
JIS A 5002	—	1以下	0.5以下	0.01以下	—	—	—

JIS A 5002: 構造用軽量コンクリート骨材

表-2 コンクリートの試験項目

フレコン シク ユリ ト	試験項目	試験方法
	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	ブリーディング	JIS A 1123
硬化ク コリ ト	圧縮強度	JIS A 1108
	引張強度	JIS A 1113
	静弾性係数	ASTM C 469

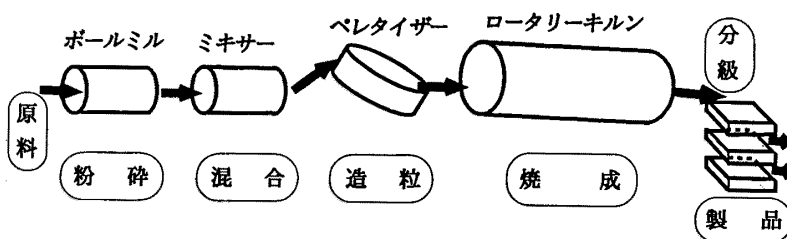


図-1 CA骨材の製造工程

び空気量をそれぞれ12cmおよび4.5%に設定したものである。なお、単位水量は所定の値が得られるように、試し練りにより定めたものである。

2. 3 試験項目

粗骨材およびコンクリートの試験項目をそれぞれ表-1, 表-2に示す。

3. 試験結果および考察

3. 1 CA骨材の特性

CA骨材は、火力発電所から発生する石炭灰（原粉）を主原料としている。表-3に原料とした石炭灰の特性を示す。また、CA骨材の製造工程を図-1に示す。なお、本CA骨材は通常の人工軽量骨材のように発泡させず、組織を意図的に緻密化した造粒型人工骨材である。骨材の比重は主原料である石炭灰に若干の加工を行い調整した。試験に用いた骨材の外観および骨材表面の電子顕微鏡写真を、それぞれ写真-1, 写真-2に示す。

CA骨材の化学成分を表-4に示す。表-4には構造用軽量コンクリート骨材の JIS規格値も併記した。この表によれば、CA骨材の ig. lossは表-1に示す原料の値よりも低い。これは骨材製造時に石炭灰中の未燃カーボンが燃焼により一部消失したと考えられる。

CA骨材の物理特性を表-5に示す。表中には軽量骨材および砕石の JIS規格値も併記した。表-5によれば、CA骨材の比重は 2.0程度で砕石より小さく、また、CA-Bは人工軽量骨材の“H”に区分されるが、CA-Aは軽量骨材および砕石のいずれにも属さない。吸水率は市販の石炭灰系人工軽量骨材、FALと比較すれば、CA-Aは1/60およびCA-Bは1/20程度と著しく小さく、砕石と比較しても同

表-5 骨材の物理特性

骨材種	絶乾比重	吸水率(%)		BS40t 破砕値 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	実積率 (%)	安定性 (%)	すりへり 減量 (%)
		1日	30日					
CA-A	2.03	0.20	0.35	36.9	1320	65.0	0.4	22.0
CA-B	1.86	0.5	0.72	30.0	1190	64.0	0.4	21.3
碎石	2.62	0.7	0.78	12.1	1610	61.3	6.1	11.6
FAL *	1.42	12.7	—	—	—	—	—	—
JIS A 5002	L M H	1.0未満	—	—	—	60以上	20以下	—
		1.0以上 1.5未満	—	—	—	60以上	20以下	—
		1.5以上 2.0未満	—	—	—	60以上	20以下	—
JIS A 5005	2.5以上	3.0以下	—	—	—	—	12以下	40以下

* FAL:石炭灰系人工軽量骨材

JIS A 5002: 構造用軽量コンクリート骨材

JIS A 5005: コンクリート用碎石

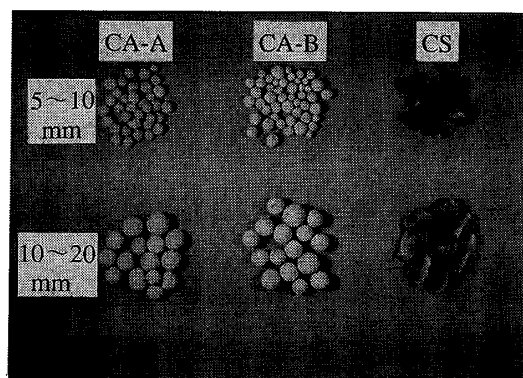


写真-1 骨材の外観

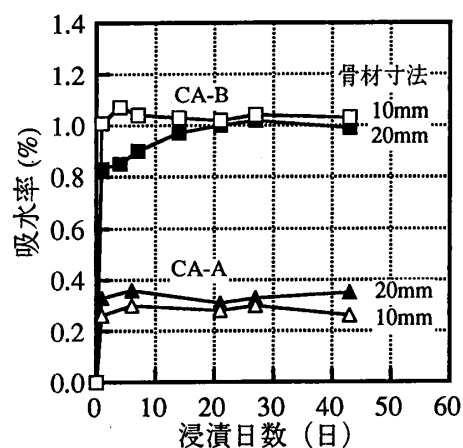


図-2 吸水率の経時変化

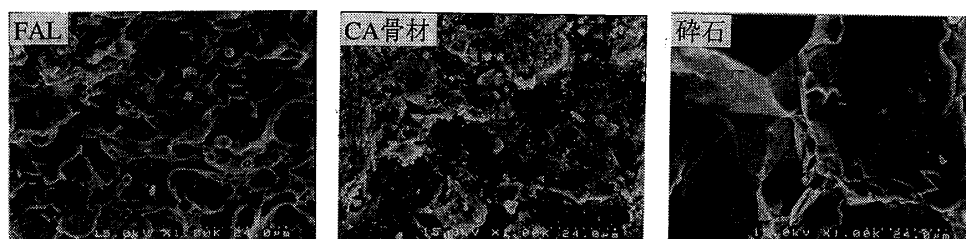


写真-2 骨材表面の電子顕微鏡写真(拡大)

等以下である。CA骨材の吸水率の経時変化は図-2に示すように、2日程度で飽水状態に達する。この理由については前掲、写真-2に示すように、FALの表面には吸水の原因と思われる多数の開気孔が確認されるが、CA骨材および碎石には観察されず、これが吸水率の差異として示されたと推察される。CA骨材の安定性は碎石よりも著しく良好であり、また、実積率も若干大きい結果を示したが、破砕値とすりへり減量は碎石よりも2倍程度大きい。

表-6 コンクリートの配合およびフレッシュの特性

骨材種	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)		温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	カービング 率 (%)
			W	C	S	G	Ad1 ^{*1}	Ad2 ^{*2}					
CA-A	58.1	44.5	151	260	832	817	0.25	0.2	20.7	13.0	5.2	2110	6.1
	50.7	43.5	152	300	798	816		0.2	20.6	13.5	5.0	2110	4.9
	40.3	41.0	153	380	724	821		0.2	20.5	12.0	4.6	2140	3.1
CA-B	56.5	44.5	147	260	836	753	0.25	0.2	19.8	12.5	5.5	2050	3.6
	49.3	43.5	148	300	802	752		0.2	20.0	12.5	4.9	2040	3.6
	40.5	41.0	154	380	723	751		0.2	19.8	12.5	4.6	2050	4.0
碎石	61.2	44.5	159	260	823	1046	0.25	0.2	20.3	11.5	4.5	2320	6.0
	54.7	43.5	164	300	784	1038		0.3	20.8	13.0	5.1	2310	5.5
	42.9	41.0	164	380	713	1046		0.3	20.7	11.5	5.0	2330	4.3

*1 Ad1: AE減水剤(25%溶液)

*2 Ad2: AE助剤(1%溶液)

3. 2 コンクリートの特性

(1) 配合およびフレッシュコンクリートの特性

CA骨材および碎石を用いたコンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの特性を表-6に示す。表によれば、CA骨材を用いた場合、所要のスランプを得るために必要な単位水量は、碎石を用いた場合と比較して、 $8\text{kg/m}^3 \sim 16\text{kg/m}^3$ 程度低減でき、低減効果はCA-Bにおいて大略大きい傾向にある。また、コンクリートの単位容積質量は、碎石を用いた場合よりもCA-Aでは約 200kg/m^3 、また、CA-Bでは約 260kg/m^3 小さく、CA骨材を用いたコンクリートは碎石を用いた場合より10%程度単位容積質量を軽減できると言える。

(2) 硬化コンクリートの特性

図-3に示すように、単位セメント量を 260kg/m^3 、 300kg/m^3 とし、CA骨材を用いたコンクリートは、碎石の場合よりも材齢にかかわらず強度発現が良好であり、この傾向はCA-Bにおいて顕著である。一方、単位セメント量を 380kg/m^3 としたコンクリートでは、材齢3日および7日においては、碎石を用いた場合とほぼ同等の圧縮強度を示したが、材齢28日、圧縮強度 550kgf/cm^2 程度では碎石の場合よりも強度発現は若干低下する傾向にある。

しかし、これらのコンクリートは同一の単位セメント量であっても、前掲、表-6に示すように、水セメント比が異なるため、骨材の相違の影響を一義的に比較することはできない。そこで、強度発現特性について検討するため、図-4によりセメント水比と圧縮強度との関係を求め

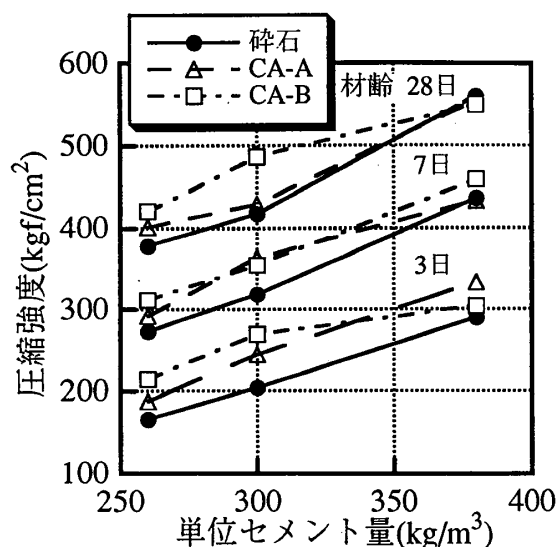


図-3 単位セメント量と圧縮強度との関係

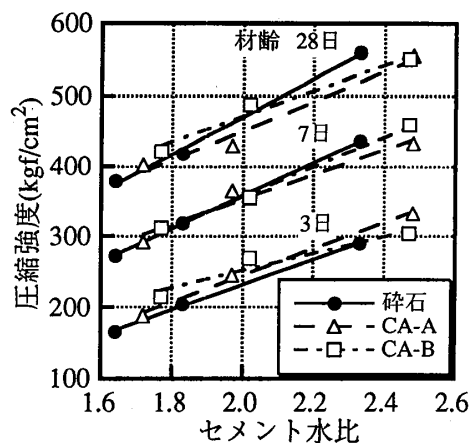


図-4 セメント水比と圧縮強度との関係

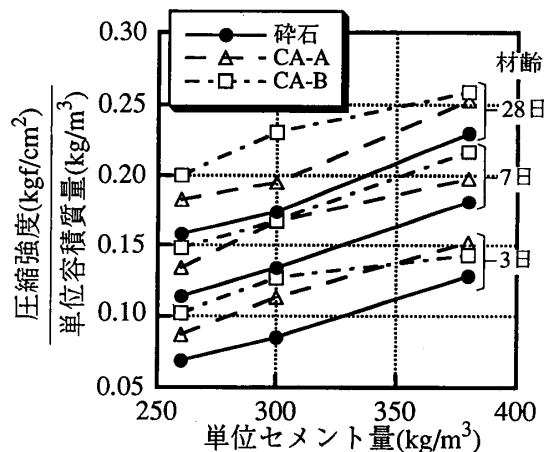


図-5 単位セメント量と単位容積質量当たりの圧縮強度との関係

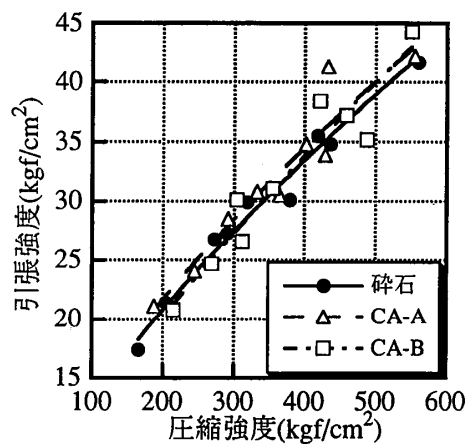


図-6 圧縮強度と引張強度との関係

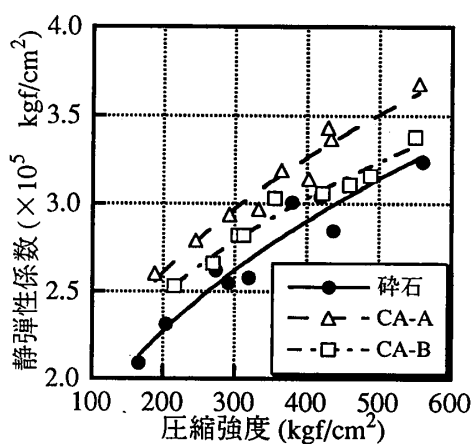


図-7 圧縮強度と静弾性係数との関係

た。図によれば、CA骨材を用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係は、碎石の場合と同様に直線関係で示すことができる。ただし、CA骨材を用いた場合、セメント水比 2.0程度に関して碎石の場合と比較すれば、圧縮強度は同程度であるが、同 2.4程度の富配合では若干小さい傾向が認められる。

一方、単位容積質量当たりの圧縮強度は、図-5に示すように、碎石を用いた場合よりCA骨材を用いたコンクリートの方が、材齢および単位セメント量のいかんにかかわらず大きい。図を詳細に見れば、CA-Bを用いた場合に一層高強度、かつ軽量のコンクリートが達成できることも確認された。

図-6に示すように、圧縮強度が 600kgf/cm² 程度の範囲までは、CA骨材、碎石のいかんにかかわらず圧縮強度と引張強度との関係は類似した曲線で示される。また、引張強度は圧縮強度の1/10～1/13の範囲にあり、この割合は高強度になるに伴って減少傾向にあり、碎石を用いたコンクリートと大差ない。これらの強度比は従来の人工軽量骨材を用いたコンクリートの値とも同様の傾向にある[2]。

圧縮強度と静弾性係数との関係を図-7に示す。図によれば、静弾性係数は同一の圧縮強度において比較すれば、碎石よりもCA骨材を用いたコンクリートの方が大きい。一般に、圧縮強度が同

一の場合、コンクリートの比重が小さい程、静弾性係数も小さい[2]。

しかし、本試験の結果は傾向を異にする。そこで、写真-3により骨材表面を観察すると、CA骨材の表面は $10\mu\text{m}$ 程度の凹凸が全体に存在し、起伏に富むが、碎石の場合には比較的平滑である。また、写真-4に示すように、骨材下面とセメントペーストとの付着界面の組織は、CA骨材の場合密実であるが、碎石では非常に多孔質であることも示された。CA骨材は碎石より比重が小さいにもかかわらず、同一圧縮強度における静弾性係数が大きいことは、上述、観察結果より、骨材表面状態の差異等により、骨材とセメントペーストとの付着特性が改善されたことも一因であると考えられる。

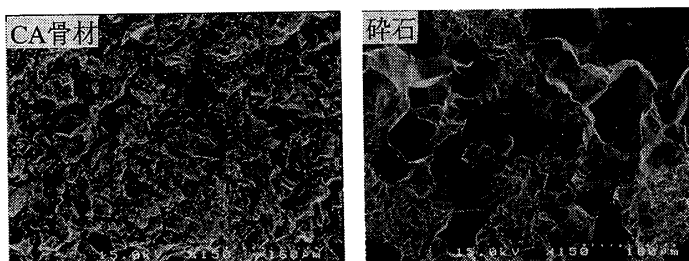


写真-3 骨材表面の電子顕微鏡写真

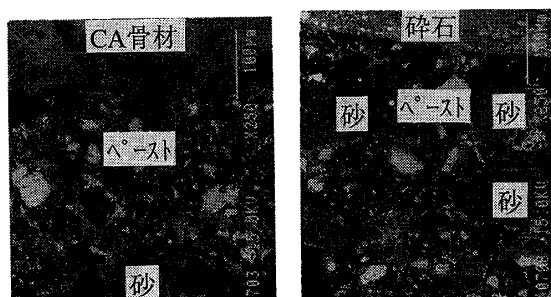


写真-4 骨材とセメントペースト界面の電子顕微鏡写真

4. まとめ

以上、CA骨材の特性およびCA骨材を用いたコンクリートの諸特性について比較検討を行った結果を要約すれば以下のとおりである。

(1) CA骨材の特性

CA骨材は構造用軽量コンクリート骨材および碎石の JIS規格を満足する。特に、吸水率は碎石よりも低い傾向を示した。

(2) フレッシュコンクリートの特性

コンクリートの単位水量は碎石を用いた場合よりも $8\text{kg}/\text{m}^3 \sim 16\text{kg}/\text{m}^3$ 低減できる。単位容積質量は碎石を用いた場合より 10%程度軽減できる。

(3) 硬化コンクリートの強度特性

CA骨材を用いたコンクリートは、碎石の場合よりも軽量であるが、単位水量が低減できるため、強度発現が良好であり、この傾向は単位セメント量の少ない場合に顕著である。同一のセメント水比で比較すれば、骨材を相違させても強度は大差ないが、セメント水比 2.4程度の富配合では碎石と比較して強度が若干低下する傾向にある。圧縮強度と引張強度との関係は、碎石を用いた場合と同様な結果を示した。同一圧縮強度における静弾性係数は、碎石を用いた場合より高い結果を示した。これは付着特性が改善されたことも一因と考えられる。

参考文献

- 1) 日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック、PP. II-8- II-10、1990.5
- 2) 奥島正一：人工軽量骨材を用いたコンクリートの力学的性質、セメント・コンクリート、Vol.259、PP.68-75、1968.9