

論文 石炭灰製高強度人工骨材を用いたコンクリートの強度・耐久性状

十河茂幸*1・三浦律彦*2・近松竜一*3

要旨：資源の有効利用の観点から、石炭灰を原料とした高強度人工骨材が試作され、その実用化が試みられている。本研究は、この高強度人工骨材を各種のコンクリートに用いることで、ワーカビリティに優れ、高強度で高い耐久性能を有する高性能な軽量コンクリートが実現できると考え、実験的研究を試みたものである。その結果、高強度人工骨材を粗骨材として用いることで、普通砕石を用いた場合よりも単位容積質量が10%以上小さく、軽量化した上に、施工性に優れ、100N/mm²程度の高強度コンクリートを容易に製造できることが明らかとなった。

キーワード：石炭灰、高強度人工骨材、軽量コンクリート、高強度コンクリート

1. はじめに

人工軽量骨材は、これまで膨張性頁岩を焼成・発泡して軽量化したものが一般に使用されてきた^{1)・2)}。これらの骨材は、絶乾状態の密度が原材料の約半分、表層が硬い殻で覆われているとはいえ、骨材の吸水率が大きく、打込み時におけるスランブロスやポンプ圧送性の低下など、使用上の取扱いに配慮すべき点が多い。これに対し、資源の有効利用の観点から、フライアッシュを原料とした高強度人工骨材が試作され、その実用化が試みられている^{3)・4)}。

この高強度人工骨材は、膨張性頁岩より密度が小さいフライアッシュを原材料として緻密に焼成したもので、骨材自体の強度が高く、吸水率が小さいものが製造できる。そのため、これを用いたコンクリートは、軽量で施工性が良く、耐久性に優れていることが容易に類推される。

本研究は、高強度人工骨材の形状・寸法から高流動コンクリートとして用いた場合に、充てん性にも優れ、高強度で高い耐久性能を有する高性能な軽量コンクリートが実現可能と考え、実験的研究を試みたものである。

2. 高強度人工骨材

本研究で使用した高強度人工骨材は、フライアッシュを原料にこれを造粒、焼成したもので、球状で、緻密な組織が形成されている。骨材の表乾密度は1.74g/cm³、吸水率は2.54%である。

高強度人工骨材としては、細骨材、粗骨材ともに製造可能であるが、細骨材の場合には密度が大きくなり、軽量化の効果が少ないことから、本研究では粗骨材としてのみ軽量骨材を用いることとした。なお、軽量粗骨材は20~15mm、15~10mm、10~5mmに予め分級したものを24時間吸水させ、表乾状態に調整して使用した。

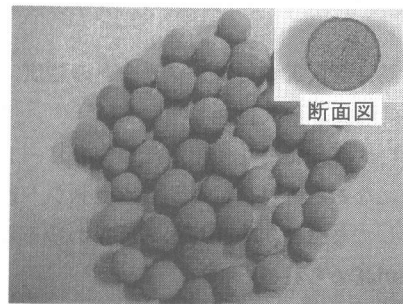


写真-1 石炭灰製高強度人工骨材

*1 大林組技術研究所 土木第三研究室 室長 工博（正会員）

*2 大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員 工修（正会員）

*3 大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員 工修（正会員）

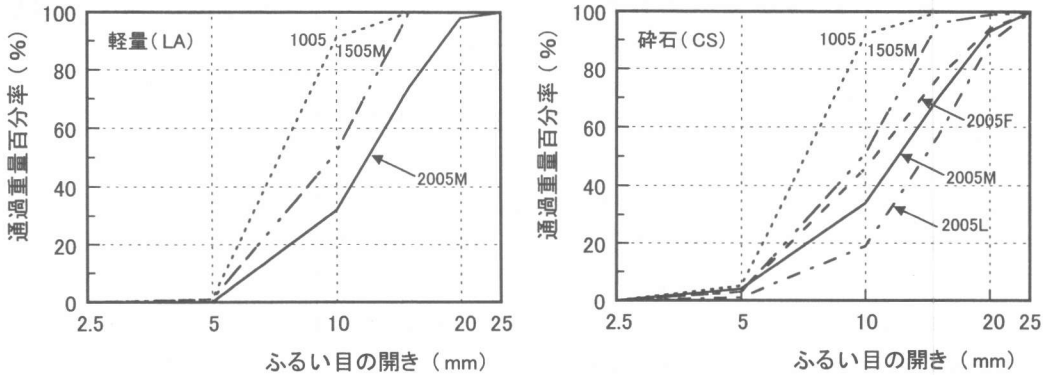


図-1 実験に用いた高強度人工骨材および砕石の粒度分布曲線

3. 実験概要

3.1 人工骨材の粒度が高流動コンクリートの自己充てん性に及ぼす影響

高強度人工骨材および砕石を用い、単位粗骨材絶対容積を一定 ($0.330\text{m}^3/\text{m}^3$) として、スランブフローが $650 \pm 50\text{mm}$ の高流動コンクリートを作製した。表-1, 図-1 に示す8種類の粒度の粗骨材を用い、充てん性への影響を調べた。

3.2 高強度人工骨材を用いたコンクリートの加圧ブリーディング特性

水セメント比30%の高流動コンクリート及び水セメント比55%の普通コンクリートにおいて、高強度人工骨材及び普通砕石を用いたコンクリートの加圧ブリーディング特性を比較した。

3.3 高強度人工骨材コンクリートの強度、変形及び耐久性能

一般に、軽量骨材を使用したコンクリートは、高強度になると骨材の強さから水セメント比を小さくしても強度が増加しない、いわゆる頭打ち現象が認められる。

そこで、高強度人工骨材自体の強さとコンクリート強度の関係を確認するために、水セメント比を変化させた配合により、比強度への影響を調べた。また、これに併せて引張強度、静弾性係数、乾燥収縮特性、凍結融解抵抗性についても検討を加えた。

表-1 実験に用いた各種粗骨材の粒度

種類	記号	ふるい通過割合 (%)						粗粒率
		25	20	15	10	5	2.5	
軽量	2005M	100	98	74	32	0	0	6.70
	1505M	100	100	100	52	1	0	6.47
	1005	100	100	100	91	1	0	6.08
砕石	2005L	100	89	57	19	1	0	6.91
	2005M	100	93	70	34	4	0	6.69
	2005F	100	94	77	46	3	0	6.57
	1505M	100	99	96	51	3	0	6.47
	1005	100	100	100	92	5	0	6.03

表-2 コンクリートの種類と配合条件

種類	W/C (%)	スランブフロー (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)
高流動	25, 27, 30, 33, 35	650	-	2.0
普通	45, 55, 65		8, 12, 18	4.5

3.4 実験方法

コンクリートの種類および配合条件を表-2 に示す。高強度・高流動コンクリートは、水セメント比を25~35%の5種類とした。普通コンクリートは、スランブが一定(12cm)で水セメント比を45, 55, 65%の3水準とした。水セメント比が55%の場合は、スランブを8, 12, 18cmとし、合計5種類を試験配合として用いた。

粗骨材は、前述した高強度人工骨材のほか比較用として、砕石2005(表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率0.75%, 粗粒率6.66, 実積率59.8%)を使用した。

表-3 コンクリートの試験項目及び方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101-1975
スランプフロー	JSCE-F503-1990
V漏斗流下時間	V 6.5漏斗使用
U形充てん高さ	鉄筋障害条件 R2
空気量	JIS A 1128-1993
加圧ブリーディング	JSCE-F502-1990
圧縮強度	JIS A 1108-1993
静弾性係数	コンプレッソメータ使用
単位容積質量	TPの寸法重量より算出
引張強度	JIS A 1113-1993
長さ変化率	JIS A 1129-1993
相対動弾性係数	JSCE-G501-1986

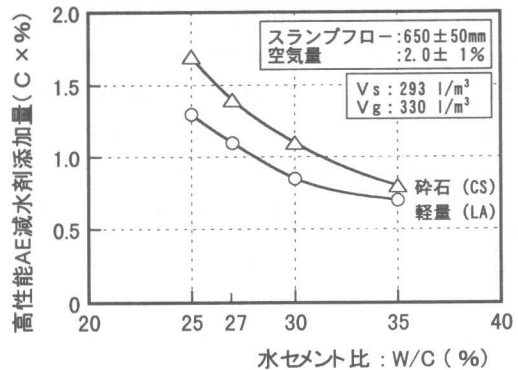


図-2 水セメント比と高性能AE減水剤量

表-4 高流動コンクリートの試験配合

粗骨材	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
			W	C	S	G	SP
軽量	35.0	47.0	187	537	774	574	3.8
	30.0		174	578			5.2
	27.0		164	610			6.7
	25.0		158	629			8.2
砕石	35.0	47.0	187	537	774	878	4.3
	30.0		174	578			6.4
	27.0		164	610			8.5
	25.0		158	629			10.7

注) 単位粗骨材絶対容積 0.330m³/m³ (一定)
粗骨材粒度: 2005M

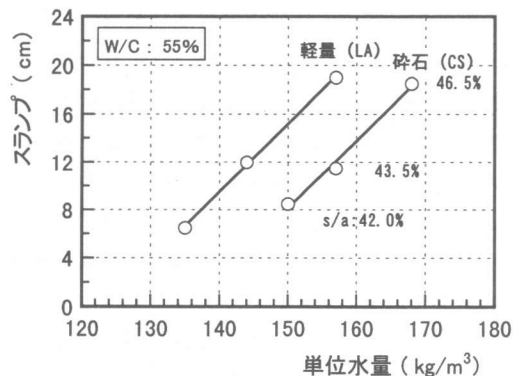


図-3 単位水量とスランプの関係

セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³, プレーン値 3,390cm²/g) を用い, 細骨材は陸砂 (表乾密度 2.64g/cm³, 吸水率 1.58%, 粗粒率 2.59) を使用した。また, 混和剤として, 普通コンクリートは AE 減水剤, 高流動コンクリートはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

コンクリートの練混ぜは, 容量が 60L のパグミル型二軸強制練りミキサを用い, 1バッチの練混ぜ量を 40L とした。骨材, セメントを投入して 30秒空練り後, 混和剤, 水を加えて 120秒 (普通コンクリートは 60秒) 練り混ぜた。

試験項目及び方法の一覧を表-3に示す。

4. 実験結果及び考察

4.1 フレッシュコンクリートの性質

高流動コンクリート配合でスランプフローを 650 ± 50mm とするための高性能 AE 減水剤の添加率を図-2に示す。本試験配合は, 表-4に示すように, 骨材の比較のために単位水量を水セメント比毎に同一としており, 砕石より高強度人工骨材を用いた場合の方が添加率は少なく, 高強度人工骨材の球形の形状が, 流動性の改善に寄与していることを示している。普通コンクリートの単位水量とスランプの関係を図-3に示す。上記した流動性の改善効果は, 水量換算では約 10kg/m³ の減水効果に相当するといえる。

水セメント比を33%，スランブフローを650±50mmと一定にした条件で，骨材の種類を変え間げき通過性および充てん性を比較した結果を図-4，図-5に示す。単位粗骨材絶対容積が同一であっても，用いる粗骨材の粗粒率によっては間げき通過性が低下する場合は認められ，粗骨材の粒度分布が土木学会の標準粒度の範囲内においても，自己充てん性に差異が生じることがわかる。

4.2 加圧ブリーディング特性

図-6に高流動コンクリート及び普通コンクリートの加圧ブリーディング試験結果を示す。砕石を用いた高流動コンクリートの試験結果は，土木学会の示すポンプ圧送の可能な範囲にあり，高強度人工骨材を用いた高流動コンクリートはこれを若干下回っている。この結果は，加圧中に高強度人工骨材が吸水したためと推定されるものであるが，各種の高流動コンクリートを対象とした既往の加圧ブリーディング試験結果⁵⁾から判断すると，ポンプ圧送には大きな支障がないものと考えられる。

なお，普通コンクリートの加圧ブリーディング試験結果から判断すると，単位水量が小さい場合，プレウェットिंगをしない場合においてはポンプ圧送が困難になることがあることを想定しておくべきと考えられる。

4.3 強度特性

各種粗骨材を使用した場合の水セメント比と圧縮強度の関係を図-7に示す。高強度人工骨材を用いたコンクリートについては，圧縮強度が100N/mm²に達しても強度の頭打ち現象はみられなかった。また，高流動コンクリートの場合には，砕石を用いた場合よりも強度が増進する傾向が認められた。

高強度人工軽量骨材コンクリートの単位容積質量は2150kg/m³であるのに対し，普通砕石を用いた場合は2450kg/m³であり，約12%の軽量

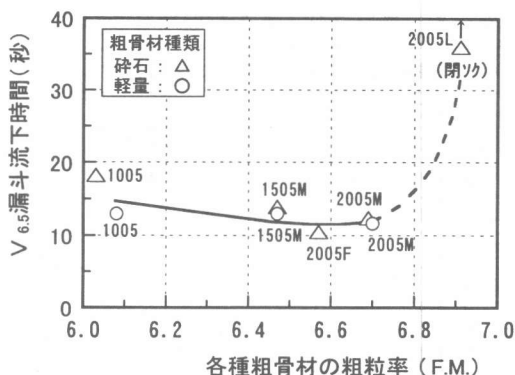


図-4 V漏斗流下試験結果

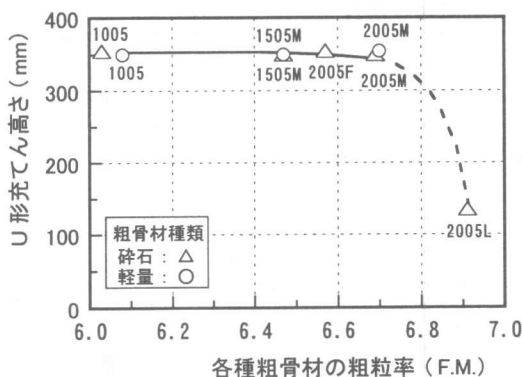


図-5 U形充てん性試験結果

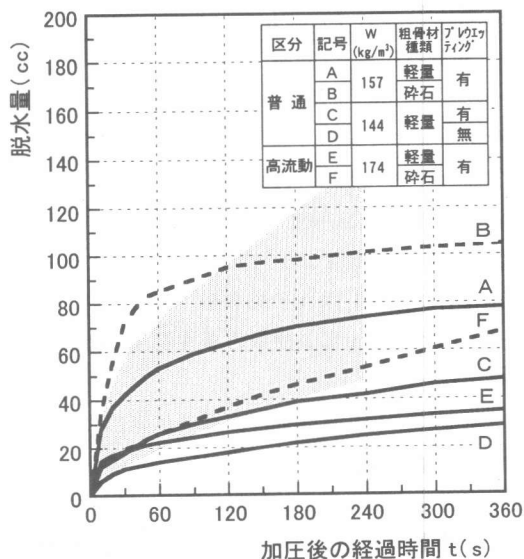


図-6 加圧ブリーディング試験結果

区分	材齢	軽量 (LA) : ○	砕石 (CS) : △
普通	7日	$f'c=21.1C/W-13.0$	$f'c=24.7C/W-17.1$
	28日	$f'c=26.5C/W-14.4$	$f'c=25.3C/W-9.93$
	91日	$f'c=32.4C/W-18.5$	$f'c=27.4C/W-6.87$
高流動	7日	$f'c=25.0C/W-14.3$	$f'c=27.8C/W-28.9$
	28日	$f'c=23.8C/W+2.04$	$f'c=30.3C/W-26.0$
	91日	$f'c=24.5C/W+10.4$	$f'c=28.3C/W-13.4$

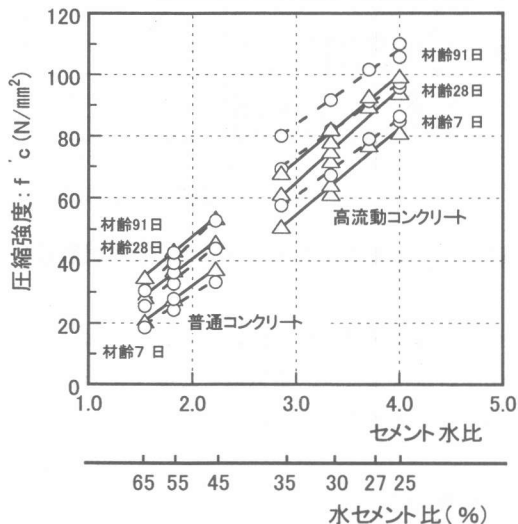


図-7 セメント水比と圧縮強度の関係

化を図りながら、 $100N/mm^2$ を超える高強度水準のコンクリートが容易に得られたことになる。

圧縮強度と引張強度の関係を図-8に示す。コンクリートの配合や使用骨材の種類によらず両者の間には良好な相関が認められる。

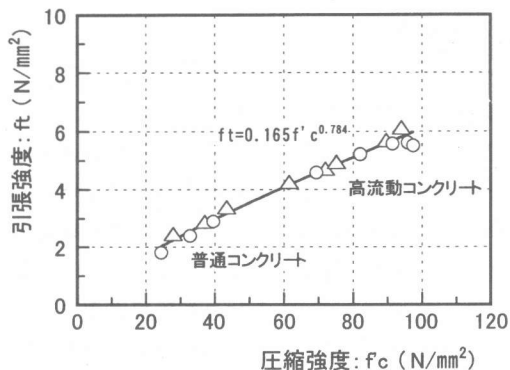


図-8 圧縮強度と引張強度の関係

区分	軽量 (LA) : ○	砕石 (CS) : △
普通	$E_c=1.610 \times 10^4 (f'_c)^{0.160}$	$E_c=1.246 \times 10^4 (f'_c)^{0.258}$
高流動	$E_c=0.365 \times 10^4 (f'_c)^{0.511}$	$E_c=0.330 \times 10^4 (f'_c)^{0.560}$

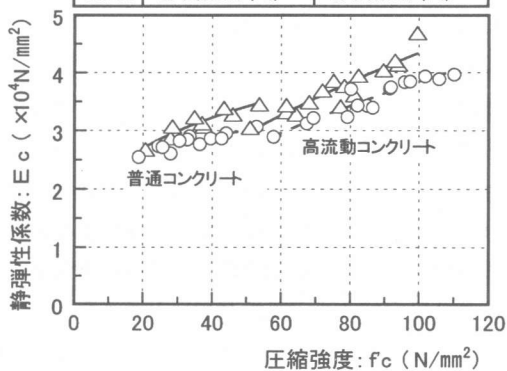


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係

4.4 変形特性

圧縮強度と静弾性係数を図-9に示す。

コンクリートの種類によらず、人工軽量骨材を用いた場合は、普通砕石を用いた場合よりも同一強度に対する静弾性係数が約10%小さくなる結果が得られた。

図-10に乾燥収縮試験結果を示す。

普通コンクリート及び高流動コンクリートとともに高強度人工骨材を使用したコンクリートの方が乾燥収縮は小さい結果が得られている。

一方、質量減少率に着目すると、高流動コンクリート、普通コンクリートとも軽量骨材の方が逆に大きい。軽量骨材中の水分の乾燥が質量減少率を大きくしているものと考えられる。

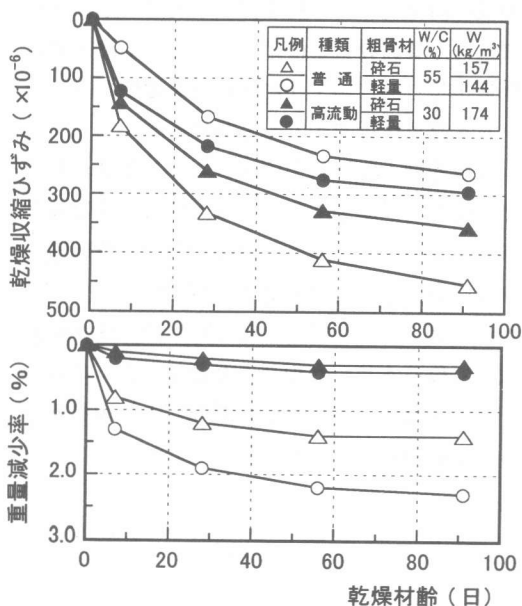


図-10 各種コンクリートの乾燥収縮特性

4.5 耐久性

高強度人工骨材を用いた各種コンクリートの凍結融解試験結果を図-11に示す。

水セメント比55%の高強度人工骨材コンクリートにおいては、砕石を用いたコンクリートよりも凍結融解抵抗性は劣るが、高強度・高流動コンクリートにおいては、空気量が2.5%程度であっても、水セメント比を27%程度まで下げた高強度配合にすることで十分な凍結融解抵抗性を確保できることが確かめられた。

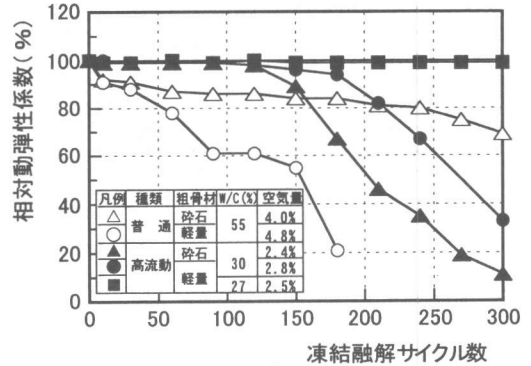


図-11 各種コンクリートの凍結融解試験結果

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 高強度人工骨材を用いたコンクリートは、普通砕石を用いたコンクリートより、流動性に優れており、同等のワーカビリティを得るための単位水量を低減できる。また、高強度人工骨材は、形状が球状であるため、高流動コンクリートにおいて、自己充てん性を確保するための単位粗骨材絶対容積を砕石を用いた場合より大きく設定できる可能性が高いと考えられる。
- (2) 高強度人工骨材を用いた場合の圧縮強度は、水セメント比を低減することにより、100N/mm²程度の高強度が得られる。この場合の単位容積質量は、普通砕石を使用した場合の約88%で、軽量化した上に施工性に優れた高強度コンクリートを容易に製造することができる。
- (3) 高強度人工骨材を使用したコンクリートの引張強度と圧縮強度の関係は、砕石を使用した場合と同様で、普通コンクリート、高流動コンクリートによる相違も認められない。
- (4) 高強度人工骨材を使用した場合の静弾性係数は、砕石を用いた場合より若干小さくなる。
- (5) 高強度人工骨材を用いた場合の乾燥収縮は、砕石を用いたコンクリートより低減される。

(6) 高強度人工骨材を用いた場合、水セメント比が27%程度では、空気量が少なくとも十分な凍結融解抵抗性が得られる。

参考文献

- 1) 土木学会編：人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル，コンクリートライブラリー第56号，1985.6
- 2) 三浦律彦ほか：高強度軽量コンクリートの乾燥収縮およびクリープ性状，土木学会第42回年次学術講演会V，pp. 354-355，1987.9
- 3) 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
- 4) 榮井建一ほか：石炭灰を原料とした新人工軽量骨材を用いたコンクリートの流動性と強度特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No. 1, PP. 411~416，1995.6
- 5) 坂本淳ほか：高流動コンクリートの加圧脱水特性に関する実験的研究，土木学会第53回年次学術講演会V，pp. 518-519，1998.10