

# 論文 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

柴井 建二<sup>\*1</sup>・友澤 史紀<sup>\*2</sup>・野口 貴文<sup>\*3</sup>・曾根 徳明<sup>\*4</sup>

要旨：新しい焼成法によって製造された石炭灰人工軽量骨材の基本性状とコンクリートに及ぼす影響について碎石、川砂利との比較検討を行ったものである。フレッシュ時の性能としてブリーディング、高強度高流動コンクリートとしての流動性、充填性、分離抵抗性について、硬化後の特性として圧縮強度、静弾性係数、引張強度について検討した。フレッシュ時の性能は川砂利とほぼ同等であり、硬化後の性能についても川砂利よりも高い性能を示し、碎石との差もわずかであった。

キーワード：石炭灰人工軽量骨材、流動性、強度特性、静弾性係数

## 1. はじめに

近年、電力需要の増大に伴い、火力発電所において石炭の需要は、増加の一途をたどっている。石炭をエネルギー源として利用した場合、石炭灰が副産されることからリサイクル資源としての大量使用方策は重要な問題といえる。一方で、コンクリート構造物の高層化によりコンクリートの軽量化が要望され、軽量骨材として石炭灰を有効利用することは、大変有意義なことであり、これらの構造物の安全性、耐久性等の向上を目指すために、軽量コンクリートの高強度化、高流動化は重要であると考えられる。

これまで多くの研究者により石炭灰を原料とした人工軽量骨材について貴重な知見が得られているが吸水率、強度の点でやや問題が残されている。従来のもものは、製造中に骨材を発泡させ内部組織を粗にしているが、本研究において用いるものは、発泡直前となるように焼成コントロールしているため内部組織が緻密化されており、軽量ながら普通骨材と同等に扱えると期待される。本研究においてその基礎性状、それを用いたコンクリートの強度特性、および高強度高流動コンクリートとしての流動性、強度特性等について検討し、実用化を目指すものである。

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料

- a) 結合材：普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。
- b) 混和剤：AE減水剤、高性能AE減水剤、空気量調整剤、および流動化剤を用いた。
- c) 骨材：細骨材として、陸砂と山砂の混合砂、粗骨材として石炭灰人工軽量骨材（以下FA骨材）、碎石および川砂利を用いた。使用材料の種類および性質等を表-1に示す。

### 2.2 試料コンクリートの種類および調合

普通コンクリートとして水結合材比を2水準、粗骨材にFA骨材と碎石の2種類の組み合わせで4種類、高強度高流動コンクリートとして水結合材比を2水準、高炉スラグ

表-1 使用材料の種類および性質

結合材	普通ポルトランドセメント	比表面積:3260cm <sup>2</sup> /g、比重:3.16
	高炉スラグ微粉末	比表面積:1570cm <sup>2</sup> /g、比重:2.91
混和剤	AE減水剤	リグニン・ポリオール複合体
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
粗骨材	FA骨材	Gmax:15mm、表乾比重:1.94、吸水率:2.32、実積率:62.1%
	青梅産碎石	Gmax:15mm、表乾比重:2.63、吸水率:0.85、実積率:59.3%
	台湾産砂利	Gmax:15mm、表乾比重:2.68、吸水率:1.08、実積率:64.0%
細骨材	混合砂	大井川産陸砂:千葉産山砂=95:5、表乾比重:2.62、FM:2.74

- \* 1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻（正会員）
- \* 2 東京大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）
- \* 3 東京大学助手 工学部建築学科、博士（工学）（正会員）
- \* 4 秩父小野田(株)（正会員）

表-2 試料コンクリートの種類および調合

種類	骨材の種類	記号	目標スラング(70-) (cm)	目標空気量 (%)	水粉体比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				科学混和剤(P×%)			
								セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材	(高性能) AE 減水剤	空気量調整剤	流動化剤	
普通	石炭灰	FA50	18±1	4.5±0.5	50	47.4	175	350	0	836	665	0.40	0.001	0.30	
	碎石	CS50									928				
	石炭灰	FA40									762				665
	碎石	CS40													928
高強度高流動	石炭灰	FA30	65±5	4.5±0.5	30	49.7	170	283	283	778	570	1.42	0.001		
	碎石	CS30									795	1.45	0.003		
	川砂利	RG30									804	1.45	0.002		
	石炭灰	FA25									681	570	1.50		
	碎石	CS25										795	1.60		
	川砂利	RG25										804	1.55		

表-3 試験項目

微粉末混入率50%とし、3種の粗骨材の組み合わせで6種類の合計10種類を製造した。試料コンクリートの種類および調合を表-2に示す。

コンクリートの種類	試験項目									
	スラング	ブリーディング	スラング70-	70-速度	Vロート	鉄筋通過	分離抵抗	圧縮強度	引張強度	静弾性係数
普通	○	○						○	○	○
高強度高流動			○	○	○	○	○	○	○	○

2. 3 コンクリートの練混ぜおよび成形方法

a) : 練混ぜ時間：普通コンクリートはモルタルを60秒、粗骨材投入後90秒、高強度高流動コンクリートはモルタルを150秒、粗骨材投入後60秒練混ぜた。ミキサは100ℓ強制攪拌パン型を用いた。

b) 成型方法：分離抵抗性試験の試験体は1層詰め、突き、叩きなし、その他の試験体は、2層詰め5回突きを行い成型した。

2. 4 試験項目

本実験で行った試験項目を表-3に示す。Vロート流下時間、鉄筋間通過性試験および分離抵抗性試験については以下の方法で行った。

a) Vロート流下時間：図-1に示す装置内に充填したコンクリートが吐出口から全量流下するまでの時間を測定する。

b) 鉄筋間通過性：試験器は図-2のような寸法H×B×D=400×280×100mmの箱形容器でありその中にコンクリートを充填し、下部の直径10mmの鉄筋を配した高さ80mmの開口部から流出したコンクリートの重量比を測定する。鉄筋の空き間隔は、37、47、60mmの3種類を使用する。

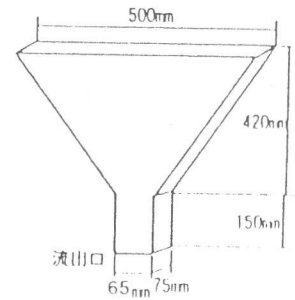


図-1 Vロート試験装置

c) 分離抵抗性：振動テーブルで、3000Hzの縦振動を90秒間加えたφ100×200mmの円柱試験体を各条件下で3本製作し、硬化後打ち込み方向断面における全粗骨材個数、個々の粗骨材面積

積を定し、次式により粗骨材沈下度(Dag)を測定する。[1]

$$Dag = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i/A) \times (H - 2L_i/H)}{n}$$

ここで n ; 全粗骨材個数

A<sub>i</sub> ; 切断面に現れた粗骨材iの面積

A ; 切断面に現れた粗骨材の面積の総和

H ; 容器高さ

L<sub>i</sub> ; 粗骨材iの下面からの距離

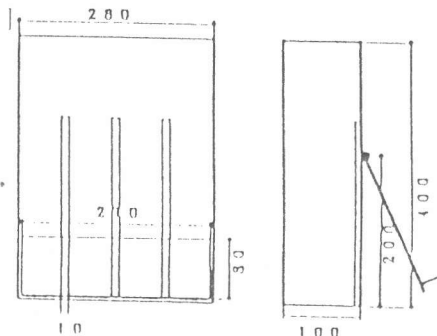


図-2 鉄筋間通過性試験装置

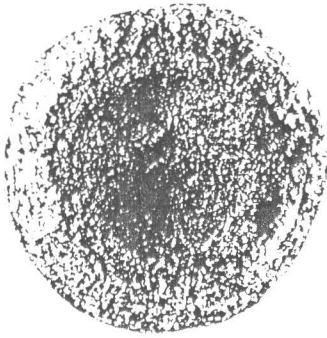


写真-1 FA骨材断面

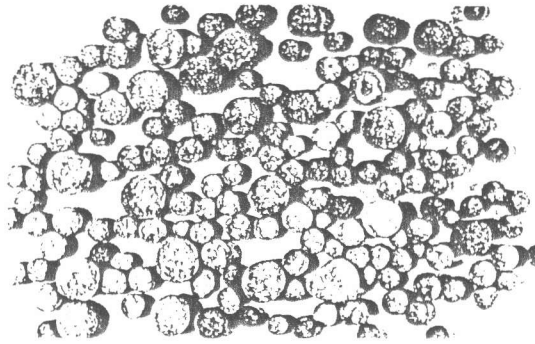


写真-2 FA骨材外観

表-4 FA骨材物理試験結果

大きさ (mm)	表乾 比重	絶乾 比重	吸水 率(24h) (%)	最高 吸水率 (%)	単位容 積重量 (kg/l)	実積率 (%)	40t 破砕値 (%)	FM
15~10mm(a)	1.96	1.94	1.07	1.78	-	-	-	-
10~5mm(b)	1.92	1.86	3.15	5.04	-	-	-	-
混合15~5mm	1.94	1.90	2.32	3.74	1.18	62.1	23.6	6.55

混合比：(a):(b)=40:60 (%)

### 3. 石炭灰骨材の基礎性状

写真-1にFA骨材の断面を、写真-2にFA骨材の外観を、表-4にFA骨材の物理試験結果をそれぞれ示す。これに基づき主要特性についてまとめると以下のようになる。

a) 比重：絶乾比重は、粒度15~10mmのものが1.96、10~5mmのものが1.92となり、粒度の大きいものの方が比重が大きいことが分かる。従来の石炭灰を原料とした人工軽量骨材の比重は1.4前後であるから、約1.4倍であり、JIS A 5002構造用軽量コンクリートの区分では1.5以上2.0未満の種類Hに相当する。原料として用いた石炭灰の比重が2.08であることから内部組織が緻密であることが分かる。

b) 吸水率：24吸水率は、粒度15~10mmのものが1.07%、10~5mmのものが3.15%となり、粒度の大きいものの方が吸水率が小さいことが分かる。4:6の割合で混合した場合は2.32%となり、青梅産碎石の0.85%、台湾産砂利の1.08%と比較すると若干大きめではあるが、従来のものと比較した場合は、かなり小さいと考えられる。最高吸水率は、骨材を2時間煮沸し放水状態として測定した。4:6の割合で混合した場合3.74%となり、写真-1で見られるようにFA骨材内部が密であることが分かる。

c) 40t破砕値：40t破砕値の結果も従来のものと比較すると23.6%と小さく、コンクリートの強度にかなり好影響をもたらすことが予想される。

d) その他：FA骨材は、写真-2に見られるように、粒形がよく粒径が15mmと9mm程度のものを多く含み、実積率は62.1%でJIS A 5002構造用軽量コンクリートの区分では60.0以上の種類Aに相当する。

### 4. フレッシュコンクリートの性状

#### 4.1 プリーディング

普通コンクリートのプリーディング性状を図-3に示す。水粉体比50%において差が見られた。FA骨材は、比重が小さいためプリーディングが起こりにくいと考えられる。また、単位容積質量はJIS A 5002構造用軽量コンクリートの区分では2.0以上の種類21に相当した。

#### 4.2 流動性

高性能AE減水剤使用量を図-4に、Vロート試験の結果を図-5に、スランプフロー到達時間を図-6に示す。スランプフローを65±5cmに高性能AE減水剤量

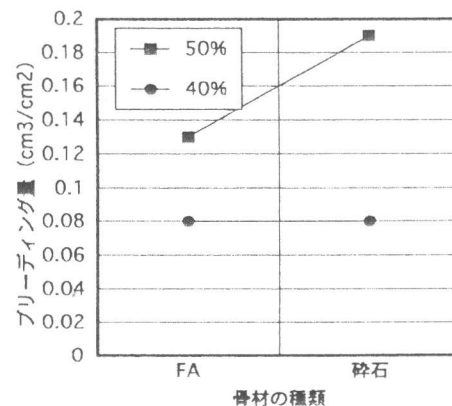


図-3 プリーディング性状

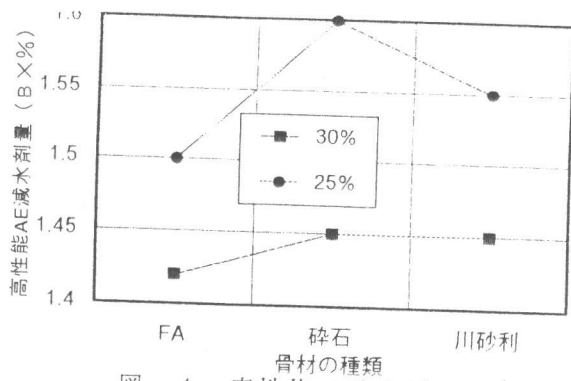


図-4 高性能AE減水剤

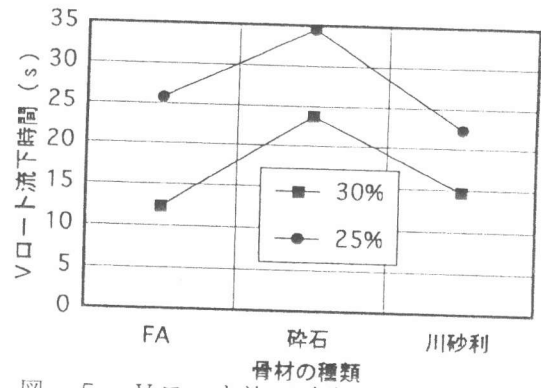


図-5 Vロート流下時間

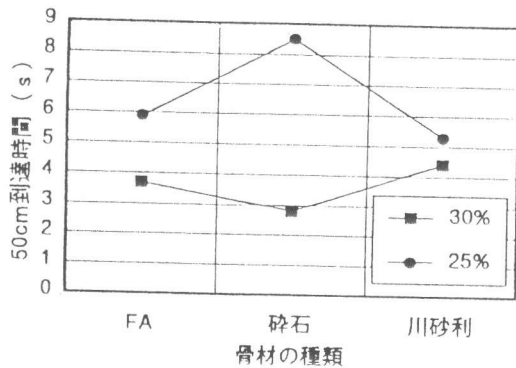
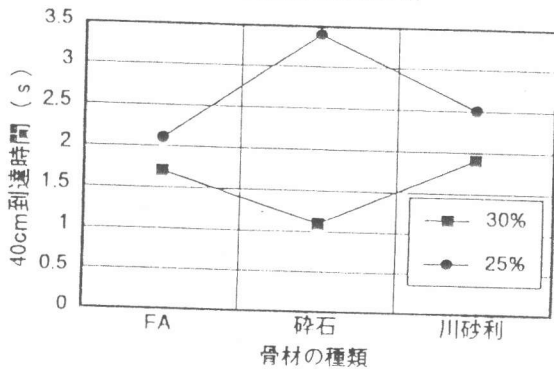


図-6 スランプフロー到達時間

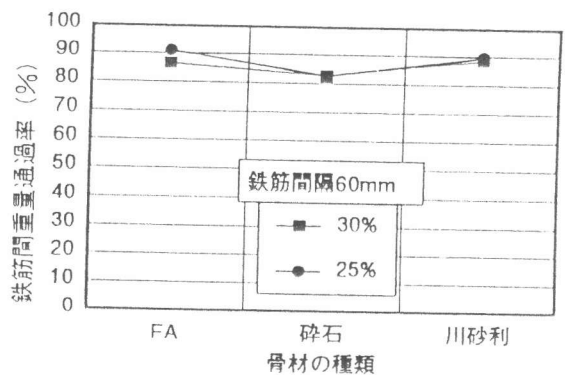
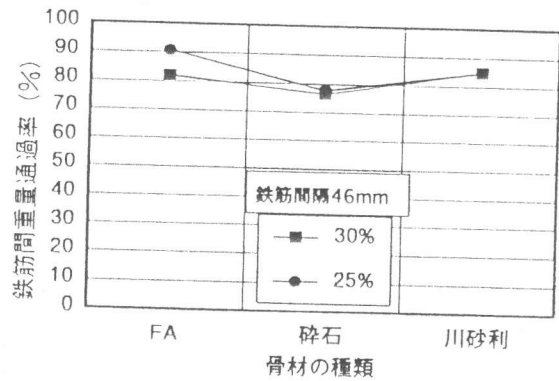
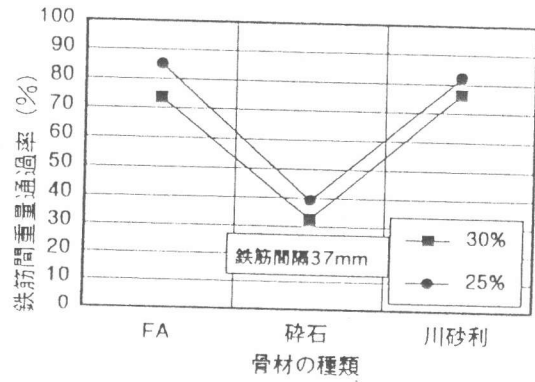


図-7 鉄筋間通過性試験結果

で調節した結果、FA骨材を用いたものが、水粉体比に関わらず碎石、川砂利を用いたものより同一スランプフロー値を得るのに必要な高性能AE減水剤量は少ない結果となった。Vロート試験においても流下時間が短く、川砂利と同等の流動性を示しており、骨材の粒形の影響がうかがえる。スランプフロー到達時間については、水粉体比25%において碎石を用いたものの速度が遅く30%においては顕著な差は見られない。以上のことから流動性においては、骨材の粒形の影響が大きいと考えられる。

#### 4. 3 充填性

鉄筋間通過性試験の結果を図-7に示す。鉄筋間隔37cmにおいて碎石骨材を用いたものは閉塞を起こした。鉄筋間隔46、60mmにおいては3種の骨材を用いたものすべて80%以上の通過率で高い充填性を示している。FA骨材を用いたコンクリートは、骨材の実積率が62.1%と高いことから川砂利と同程度の充填性を表している。

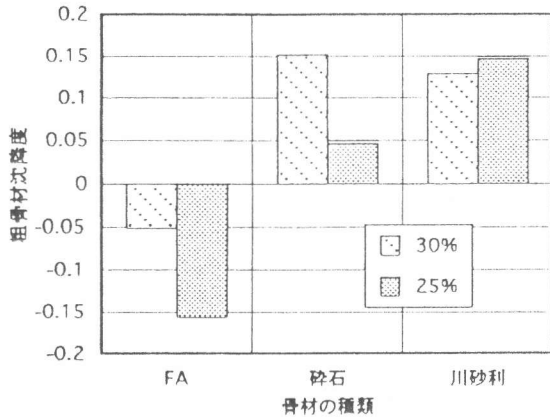


図-8 粗骨材沈降度

#### 4. 4 分離抵抗性

分離抵抗性試験の結果を粗骨材沈降度で図-8に示す。モルタルの比重が水粉体比25%で2.34、30%で2.31とFA骨材より重い場合FA骨材が浮上する結果となった。骨材が沈む、浮くの相違はあるが、粗骨材の分離の程度は粗骨材沈下度の絶対値で評価でき、その数値から明らかのように、FA骨材は、砕石、川砂利と同程度の分離抵抗性を有することが明らかとなった。

#### 5. 硬化したコンクリートの性状

##### 5. 1 圧縮強度

圧縮強度の発現状況を図-9に示す。砕石を用いたものが最も強度が大きく、FA骨材、川砂利を用いたものの順に強度が大きくなる傾向があった。材齢28日においてFA骨材の強度は水粉体比25%において最大87.8MPaを示し、砕石との差は水粉体比が小さくなるに従い大きくなる傾向があった。しかし、川砂利よりも約8%大きく砕石との比較でも差は10%未満にとどまり、従来のものと比較して高強度であるといえる。40%破砕値に見られるように骨材の強度自体が高強度であるため、コンクリートの強度にかなり寄与すると考えられる。

##### 5. 2 静弾性係数

測定値とNew RC施工基準の式に基づき圧縮強度、単位容積重量から粗骨材の種類による係数を求めた結果を図-10に示す[2]。FA骨材を用いたものは、水粉体比30%で $3.26 \times 10^4$ MPa、25%で $3.60 \times 10^4$ MPaと高い値を示し砕石を用いたものとの差は少なかった。骨材によって決定される係数はFA骨材を用いたものが1.25と砕石を用いたものと比較して高い値を示している。理由については、骨材とマトリックスの界面の付着力の強さとFA骨材の外殻のシェル構造にあると考えられるが、今後の検討課題としてあげられる。

##### 5. 3 引張強度

引張強度の発現状況を図-11に示す。圧縮強度と同様に砕石を用いたものが最も大きく、FA

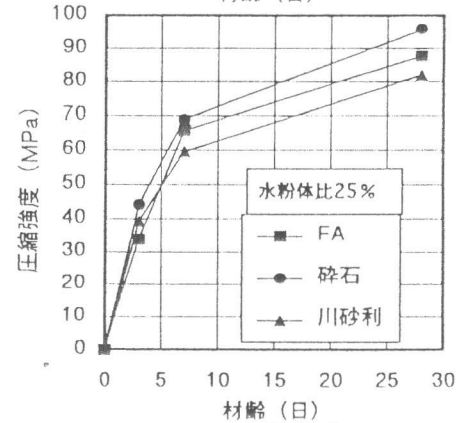
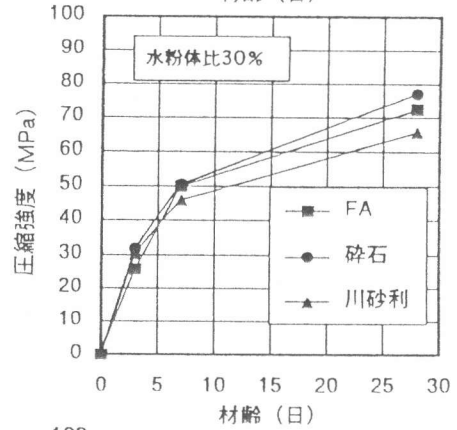
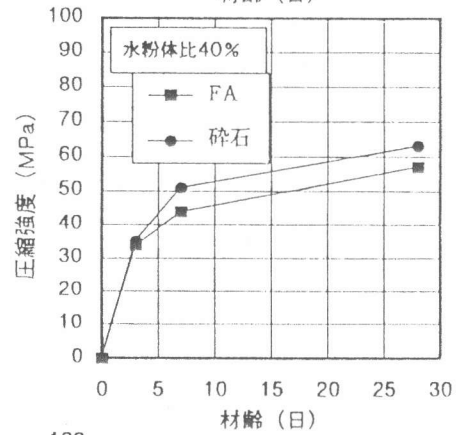
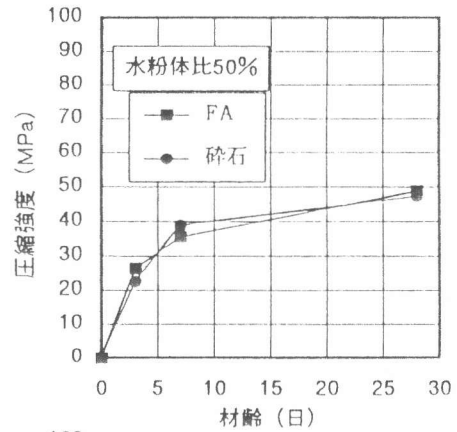


図-9 圧縮強度

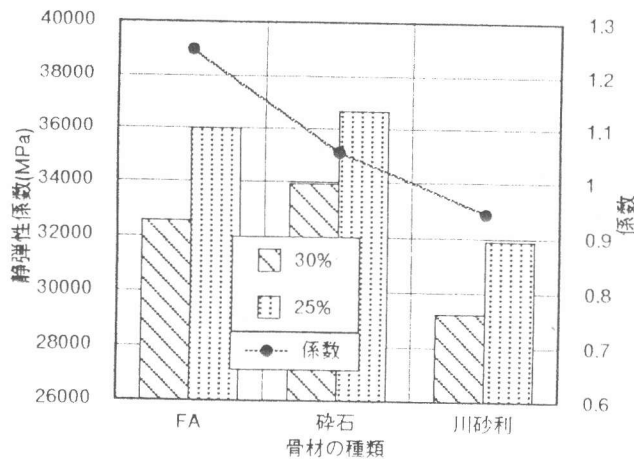


図-10 静弾性係数および骨材の係数

骨材、川砂利を用いたものの順に強度が大きくなる傾向があったが、FA骨材を用いたものと砕石を用いたものの差は10%程度であった。

#### 6. まとめ

本実験にてFA骨材を用いたコンクリートに関して得られた知見を以下に示す。

- 1) FA骨材は吸水率が低く、強度が大きい。
- 2) コンクリートのフレッシュ時の流動性、充填性においては、砕石よりも高く川砂利とほぼ同等と考えられる。
- 3) 強度発現においては、川砂利よりも高い性能を示し、砕石と比較してもその差は小さく従来のFA骨材と比較した場合かなり高い強度が得られた。
- 4) 比重、強度から比較して高い静弾性係数を示し、砕石と比較しても大きな差はない。
- 5) 構造部材として用いられるコンクリートの骨材として実用性の可能性が高いと考えられる。

なお、本FA骨材は電源開発(株)、(株)電源コール・テックおよび秩父小野田(株)の共同研究により開発されたものである。

謝辞：実験を行うにあたり八洋コンクリートコンサルタント(株)および東京大学工学部建築学科の李翰承、呉相均両君に協力いただいたことを深謝致します。

#### 参考文献

- [1] 谷川恭雄、森博嗣、渡辺健治：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートのコンシステンシーに関する研究、第46回セメント技術大会講演集、pp.382~387、1992
- [2] Tomosawa F. and Noguchi T., "Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete", Proc. of utilization of high strength concrete, Vol. 2, pp.1247~1254, 1993

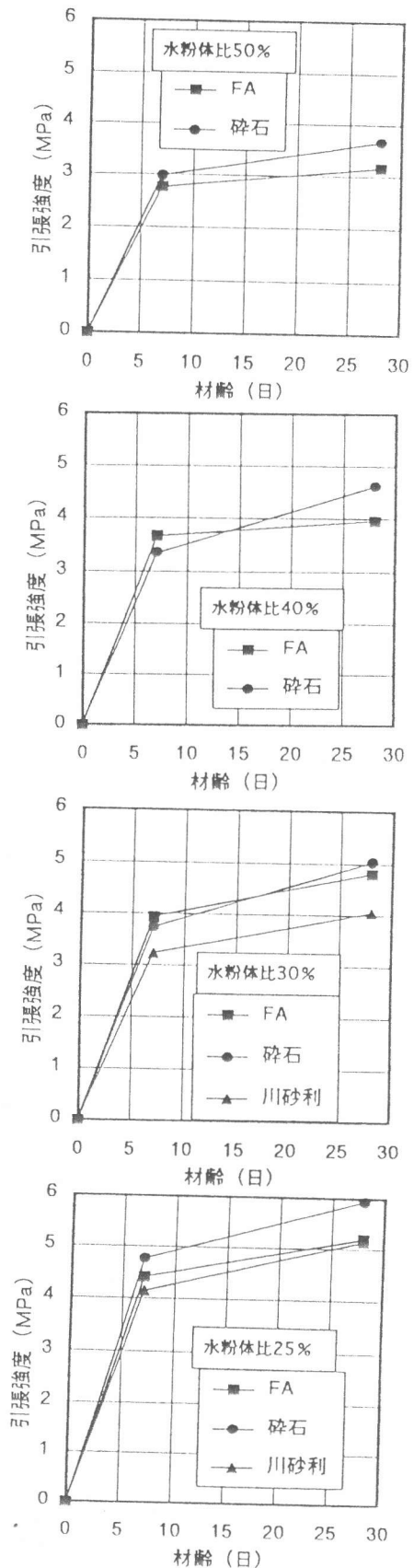


図-11 引張強度