

論文

[1015] フライアッシュの品質の違いが高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響

高山俊一<sup>\*1</sup>・出光隆<sup>\*2</sup>・山崎竹博<sup>\*3</sup>・畑元浩樹<sup>\*4</sup>

1. まえがき

わが国のエネルギー源として石炭の占める率は高く、今後ともその状況は継続して行くようである。しかしながら、埋立地などの規制が厳しくなった今、その燃焼後に排出される石炭灰の処理には、一段と困難を伴うものと予想される。筆者らは、火力発電所から排出される石炭灰のうち、電気集塵機で収集されたフライアッシュ（EP灰）の有効利用に関する研究を実施している。本研究では海外炭の燃焼で生じる比較的低位品質のフライアッシュと国内炭フライアッシュを用いて、それらの高流動コンクリートへの適用を検討し、両者の品質の違いがコンクリートに及ぼす影響について比較検討を行った。

2. 使用材料

本研究で使用したフライアッシュの諸性質を表-1に示す。ブレン値に800cm<sup>2</sup>/g程度の差がある以外は、各値とも国内炭フライアッシュと海外炭フライ

表-1 フライアッシュの諸性質

フライアッシュ	湿分(%)	強熱減量(%)	比重	ブレン値(cm <sup>2</sup> /g)
国内炭	0.10	1.56	2.25	4620
海外炭	0.12	1.58	2.23	3840
JIS規格	1.0以下	5.0以下	1.95以上	2400以上

アッシュとの間にほとんど差はみられない。また、両フライアッシュともJIS規格を満足しており、コンクリート混和材としての利用は可能である。

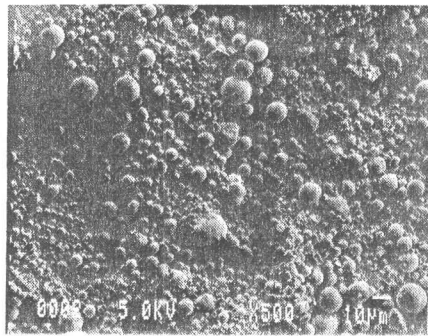
国内炭フライアッシュおよび海外炭フライアッシュの顕微鏡写真を写真-1および2に示す。それぞれ(a)は1次EP灰、(b)は2次EP灰である。表-1の値にほとんど差がみられなかったにもかかわらず、両者の写真の粒子形状には明確な差がみられる。すなわち、国内炭フライアッシュがほとんど球形をしているのに対し、海外炭フライアッシュには不定形の粒子が多く混じっている。2次EP灰は、1次EPで処理されなかったものを補集したものであり、1次EP灰より粒径が細かく、粒形も良いが採取される量が少ない。本研究で使用したフライアッシュには、国内炭フライアッシュでは1次EP灰、海外炭フライアッシュでは1次、2次の混合灰をそれぞれ採取して用いた。

表-2には使用した細、粗骨材の物理的性質を示す。また、セメントには普通ポルトランドセメントを、混和剤には主成分がポリカルボン酸エーテル系複合体の高性能AE減水剤とAE助剤をそれぞれ使用した。

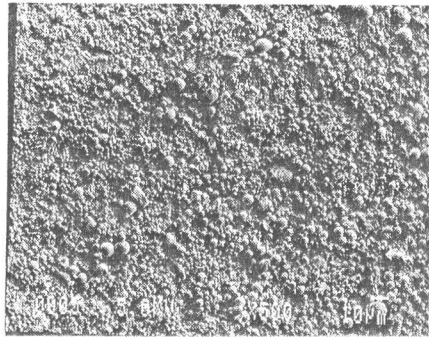
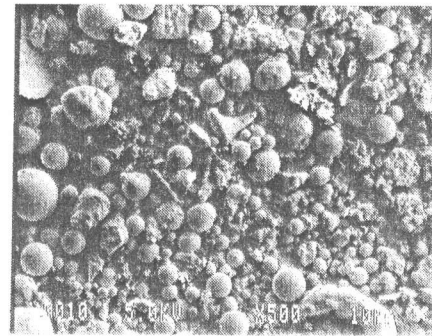
表-2 骨材の物理的性質

	細骨材	粗骨材
表乾比重	2.57	2.78
吸水率(%)	2.06	2.37
実積率(%)	63.4	61.7
粗粒率	2.77	6.77

- \* 1 九州共立大学助教授 工学部土木工学科 工博(正会員)
- \* 2 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科、工博(正会員)
- \* 3 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科、工博(正会員)
- \* 4 九州電力(株) 総合研究所、土木研究室 (正会員)



(a) 1次EP灰



(b) 2次EP灰

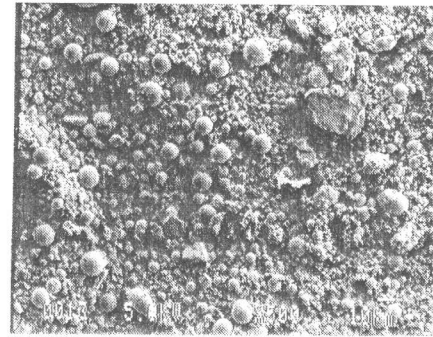


写真-1 国内炭フライアッシュの形状

写真-2 海外炭フライアッシュの形状

### 3. 高流動コンクリートの配合と流動特性

#### 3.1 単位水量を変化させた場合の高流動コンクリートの流動特性

まず、最適細骨材率の概略値を得る目的でコンクリート配合(表-3)の中の細、粗骨材のみを用いて、細骨材率を変化させて実積率試験を実施した。その結果 $s/a=50\%$ で実積率のピーク値が得られた(図-6に併示)。次に、両フライアッシュを用いて、表-3に示すように、 $s/a=50\%$ 、フライアッシュ置換率 $F/(C+F)=50\%$ 、単位結合材量 $(C+F)=550\text{kg/m}^3$ と一定にして、単位水量を変えてコンクリートの配合を定めた。実験では、それらのコンクリートを打設し、スランプフロー試験・充填試験[1]等を実施してコンクリートの流動特性を調べた。図-1にスランプフロー試験結果を、図-2に充填試験結果をそれぞれ示す。

従来の研究[1]、[2]から、高流動コンクリートとしての判定規準はスランプフロー値60cm以上、充填値30cm以上とされている。また、フロー値が70cmを超えると材料分離の傾向が強くなるので、

表-3 配合表( $s/a=50(\%)$ ,  $P=550(\text{kg/m}^3)$ )

フライアッシュ	No.	水結合材比 w/p (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )						
				水 W	結合材		細骨材	粗骨材	混和剤	
					普通ポルトランドセメント	石炭灰			AE剤	高性能AE減水剤
国内炭	1	23.6	50	130	275	275	798	863	0.055	9.9
	2	24.5		135			791	856		
	3	25.5		140			785	849		
	4	26.4		145			778	842		
	5	27.3		150			772	835		
	6	28.2		155			766	828		
海外炭	1	30.9	50	170	275	275	745	805	0.055	9.9
	2	31.8		175			738	799		
	3	32.7		180			732	792		
	4	33.6		185			726	785		
	5	34.5		190			719	778		

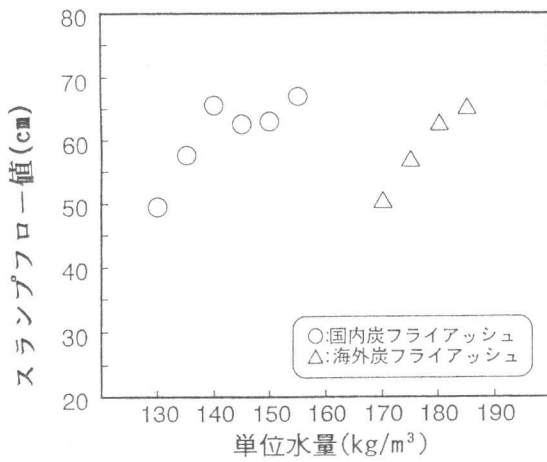


図-1 単位水量とスランプフロー値の関係

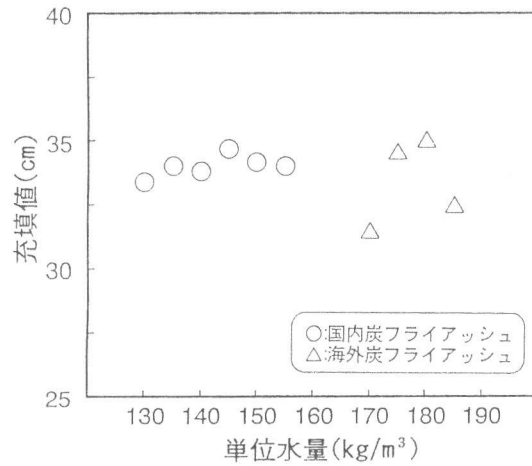


図-2 単位水量と充填値の関係

その上限値を70cmと考えると、国内炭フライアッシュでは $w = 140 \sim 150 \text{ kg/m}^3$ 、海外炭フライアッシュでは $175 \sim 180 \text{ kg/m}^3$ の配合が高流動コンクリートの条件を満足することになる。海外炭フライアッシュの特徴として、単位水量が国内炭フライアッシュに比べて約 $30 \text{ kg/m}^3$ 多くなること、また、単位水量の変化によってスランプフロー値、充填値ともに敏感に変動することなどがあげられる。後者の特徴は現場への適用を図る場合に問題となる。例えば、細骨材の表面水率が現場で変動した場合、流動性の劣るコンクリートや材料分離するコンクリートが生じ易いことを意味している。したがって、増粘剤を加え、その性質を鈍化させるなどの対応策が必要であろう。

図-3はスランプフロー試験時に20秒毎にスランプフロー値を測定して変形速度を調べたものである。コーンを引き上げてから20秒後には既に、最終スランプフロー値の約95%にまで達しており、変形速度はかなり速い。海外炭フライアッシュと国内炭フライアッシュを比較してみると、国内炭フライアッシュの方が20秒後のスランプフロー値と最終スランプフロー値との差が小さくなっており、変形速度は速いようである。図-4は練り置き時間とスランプフロー値との関係を調べたものである。単位水量が小さくなると、時間経過によるスランプフロー値の低下はやや大きくなるが、最も大きい場合でも30分後の低下率は1割程度である。国内炭フライアッシュと海外炭フライアッシュとの間にはほとんど差がみられなかった。図-5は空気量の変化を調べたものである。空気量の目標値は $4 \pm 1\%$ であるが、海外炭フライアッシュはほとんどこの範囲に入って

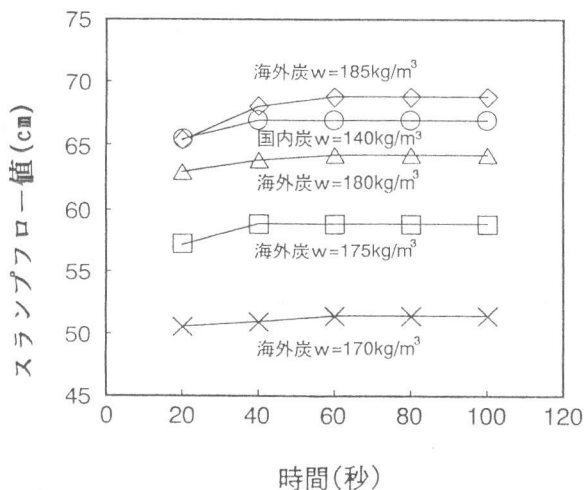


図-3 変形速度

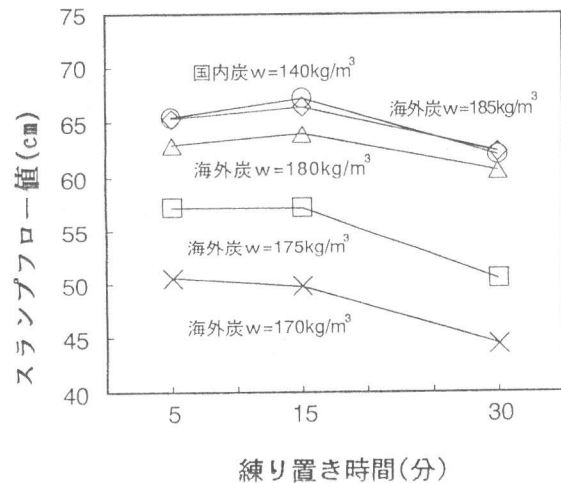


図-4 練り置き時間とスランプフロー値の関係

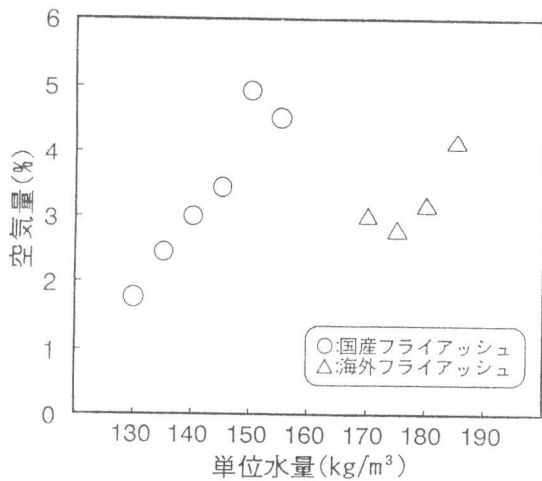


図-5 単位水量と空気量の関係

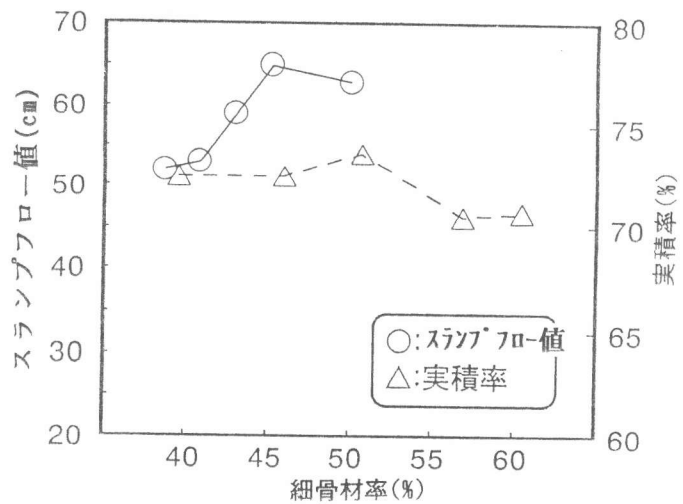


図-6 細骨材率とスランプフロー値・実積率の関係

いる。国内炭フライアッシュの場合は若干ばらつきが大きくなっている。しかしながら、この範囲を外れるのはスランプフロー値が60cm以下の流動性が劣る場合であり、他は概ねこの範囲に入っている。

### 3.2 最適細骨材率の決定

実積率試験では骨材のみを用いて細骨材率を定めたのであるが、コンクリートにはモルタル分も含まれているから、最適細骨材率も変化するはずである。その変化量を求める目的で以下の実験を行った。表-4に粗骨材容積を変化させた場合の配合表を示す。これは、3.1の表-3のコンクリートで高流動コンクリートとして適していると考えられる $w=180\text{kg/m}^3$ の配合を基に、モルタルの容積比を一定とし、粗骨材容積を20φきざみで増やしていったものである。したがってコンクリート中のモルタルの配合は $w=180\text{kg/m}^3$ の時と同一のものである。図-6に細骨材率とスランプフロー値との関係を示す。同図には、細骨材率と実積率との関係も併示した。コンクリートのスランプフロー試験の結果から最適細骨材率は約45%となり、実積率試験のピーク値 $s/a=50\%$ であるが、耐久性を考慮して最適細骨材率としては約45%が適当であると考えられる。

### 3.3 コンクリート強度

本研究の目的の一つとして、低強度(約 $200\text{kgf/cm}^2$ )コンクリートを高流動化することがあげられている。低強度のコンクリートを高流動化して欲しいという、現場からの要望も少なくないからである。図-7に結合材水比と圧縮強度との関係を示す。概略的には、海外炭フライアッシュと国内炭フライアッシュの両方の値が連続しているとみなして、一本の線で結ぶことができる。しかしながら、 $F/(C+F)=50\%$ では、高流動コンクリートとして適当な流動性を有する範囲では、海外炭フライアッシュ、国内炭フライアッシュとも4週強度で $350\text{kgf/cm}^2$ 以上の強度となってお

表-4 粗骨材容積を変化させた配合

フライアッシュ	粗骨材容積変化量 (1)	水結合材比 W/p (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)						
				水	結合材		粗骨材		混和剤	
					W	普通ポルトランドセメント	石炭灰	細骨材	粗骨材	A E 剤
	基本配合	32.7	50.0	180	275	275	732	792	0.0550	9.9
海外炭	+40	32.8	45.2	169	258	258	687	903	0.0516	9.3
	+60	32.8	43.0	164	250	250	666	959	0.0500	9.0
	+80	32.6	40.8	158	242	242	644	1014	0.0484	8.7
	+100	32.7	38.7	153	234	234	622	1070	0.0468	8.4

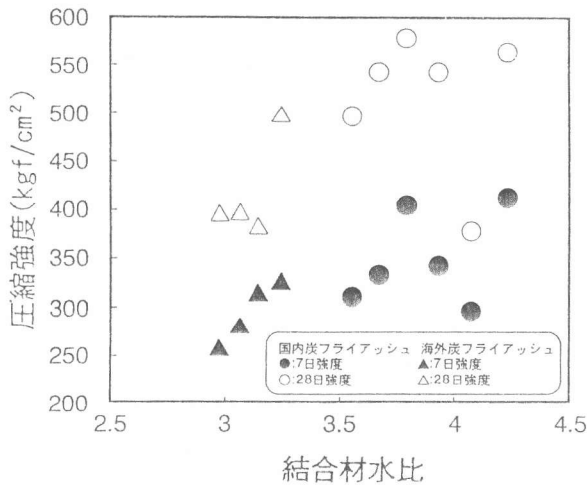


図-7 結合材水比と圧縮強度の関係

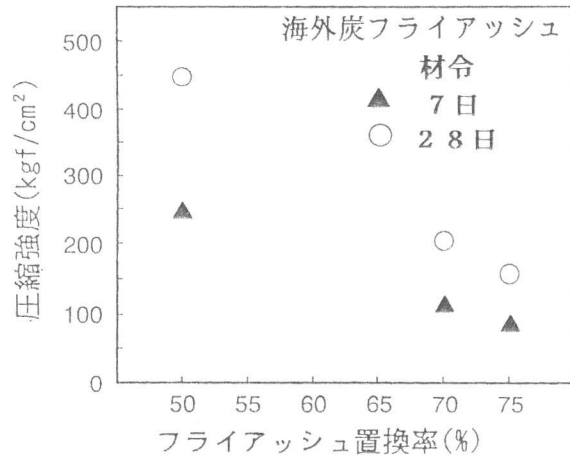


図-8 結合材のフライアッシュ置換率と圧縮強度の関係

り、強度200kgf/cm<sup>2</sup>程度でなおかつ流動性も良好な高流動コンクリートを得ることは難しい。そこで、F/(C+F)を大きくして低強度化を試みた。図-8に圧縮強度とF/(C+F)の関係を示す。F/(C+F)=70%の場合の4週強度が200kg/cm<sup>2</sup>以上となり、フライアッシュの混合比を70%と大きくすれば、低強度の高流動コンクリートが得られることが分かった。

#### 4. 高流動コンクリート中のモルタルのコンシステンシー

##### 4.1 粘度試験による粘度と降伏値の関係

高流動コンクリートの配合を決めるには、単位水量・s/a・水結合材比以外に、セメント・フライアッシュ・高炉スラグ微粉末等の結合材の配合比、流動化剤・AE剤等の混和剤量を定める必要があり、予めモルタル試験で高流動コンクリート用モルタルの配合が特定できれば、コンクリート試験の回数を大幅に減らすことができる。以下のモルタル試験はその目的で行ったものである。表-3に示したコンクリート中のモルタルと同配合の、別途練り混ぜたモルタルの粘度試験(B型粘度計を使用)を行ったところ、図-9に示す結果が得られた。3.2の結果より、流動性良好と見なされるコンクリートは、国内炭フライアッシュではw=140~150kg/m<sup>3</sup>、海外炭フライアッシュではw=175~180kg/m<sup>3</sup>であり、それらに相当するモルタルの粘度は5~20Pa・s、降伏値は3~5Paとなった。粘度20Pa・s、降伏値6Pa以上になるとコンクリートのスランプフロー値が小さく変形速度も遅くなる傾向がみられる。また、逆に粘度5Pa・s、降伏値3Pa未満になるとコンクリートのスランプフロー値は基準値を満足するが材料分離の傾向が表れてくる。以上の結果を総合して判断すると、図-9に破線で示す範囲のモルタルを高流動コンクリート用モルタルと見なし、よいようである。

##### 4.2 F/(C+F)を変えた場合のモルタルのコンシステンシー変化

F/(C+F)の変化がモルタルの流動性に与える影響を調べる目的で、海外炭フライアッシュを用いてF/(C+F)を変えて粘度試験を実施した。その結果を図-10に示す。F/(C+F)=50%の配合は、図-9の海外炭のNo.3の配合と同一であるが、粘度、降伏値ともに小さな測定値となっている。これは、試験日が異なり、材料の温度が違ったために、全体的に小さな値を示したものと考えられる。F/(C+F)=30%では粘度、降伏値とも急激に大きくなり、コンシステンシーに変化がみられるものの、F/(C+F)=40%以上の範囲では、粘度・降伏値とも値の変動は小さい。このことから、粒

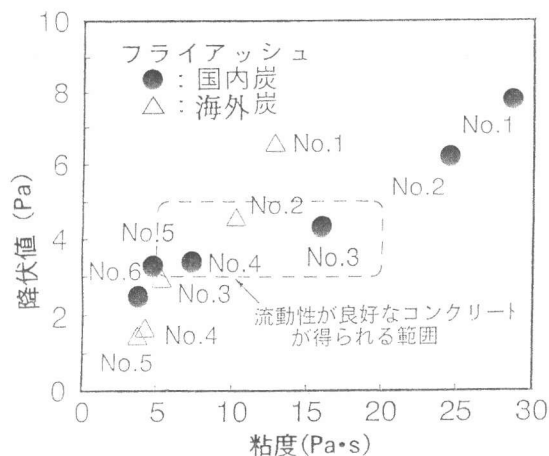


図-9 粘度と降伏値の関係

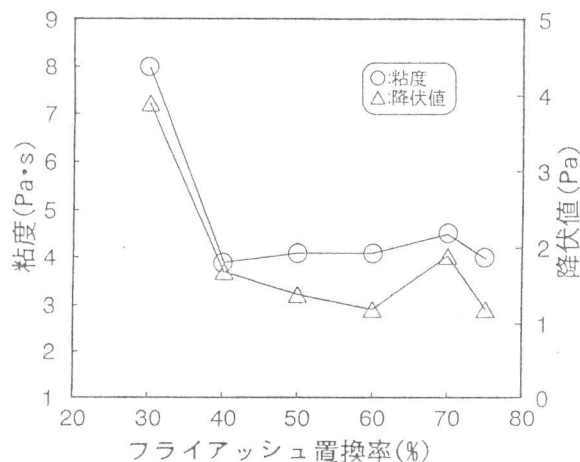


図-10 結合材のフライアッシュ置換率と粘度・降伏値の関係

形の点で劣る海外炭フライアッシュを用いる場合でも、 $F/(C+F)$ が40%以上であれば、フライアッシュ置換率を変化させてもコンクリートの流動特性は変化しないものと推察される。

## 5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- ① 比較的低品質の海外炭フライアッシュを用いても  $C+F=550\text{kg/m}^3$ 、 $F/(C+F)=50\%$ 、 $s/a=45\%$ 、 $w=175\sim 180\text{kg/m}^3$ の配合で高流動コンクリートを得ることができるものとする。ただし、単位水量の変化によって流動性は敏感に変動するようである。
- ② 粒形の良い国内炭フライアッシュでは単位水量  $140\sim 150\text{kg/m}^3$ （他は同じ条件）で高流動コンクリートを得ることができる。したがって、海外炭フライアッシュの場合は国内炭フライアッシュより単位水量を約  $30\text{kg/m}^3$  大きくしなければならない。
- ③ フライアッシュ混合比を高くすることにより、 $200\text{kgf/cm}^2$ 程度の低強度の高流動コンクリートを得ることができる。
- ④ B型粘度計を用いて高流動コンクリート用モルタルとみなしえるモルタルのコンシステンシーの範囲を定めることができた。本研究で用いた海外炭フライアッシュ用いる場合、粘度  $5\sim 20\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、降伏値  $3\sim 5\text{Pa}$ の範囲のモルタルがそれに相当する。

## 参考文献

- 1) 新藤竹文・松岡康訓・S.Tangtermsirikul・坂本淳：超流動コンクリートの基礎物性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、13-1、pp.179～184、1991.6
- 2) 肥後桂介・出光隆・山崎竹博：球状化した製鋼スラグの超流動コンクリート用細骨材としての利用に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第15巻、第1号、pp161～166、1993.6