

# コンクリートの流動性およびブリーディング性状に 及ぼす粉体材料の影響評価に関する基礎検討

上野 敦<sup>1</sup>・国府勝郎<sup>2</sup>・宇治公隆<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京都立大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: ueno-atsushi@c.metro-u.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京都立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

コンクリートの流動性およびブリーディング制御のための合理的な考え方を示すことを目的として、粉末度の異なる高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび石灰石微粉末を異なる置換率で使用した場合の、粉体系高流動コンクリートの流動性および軟練りコンクリートのブリーディング性状を検討した。使用する粉体材料の粒径や置換率の変化による粒度の変化を表面積の変化として表し、各粉体の単位表面積当たりの水量を指標とすることによって、各種の鉱物微粉末の種類や粒径による粒子表面の水に対する性質の変化を表現し、粉体材料の粒度および粒子表面の性質がペーストの流動性、粘性および保水性に及ぼす影響と、これらのペーストの性質によるコンクリートの流動性およびブリーディング性状を定量的に評価した。

**Key Words:** mineral powders, surface nature, surface area, fluidity, amount of bleeding

## 1. まえがき

コンクリートには、水和熱低減、流動性の改善、分離抵抗性の向上、長期強度の増進およびブリーディング抑制など様々な目的のため、種々の鉱物微粉末が使用されている。代表的なものは、高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび石灰石微粉末などである。これらの鉱物微粉末は、他の産業からの副産物である場合が多く、資源の有効利用の観点からも効果的かつ積極的な使用が重要となっている。

コンクリートは、固体粒子相と液体相との混合物であるため、固体材料の充てん状態や粒子同士の接触状態に影響を及ぼす粒子形状および粒度分布などの性質や、骨材粒子については粒子表面のラフネスおよび石質、粉体粒子に関しては粒子表面の濡れ性や表面積の大きさなどによってコンクリートの様々な性質が変化する。特に、粉体材料は、コンクリートの使用材料中で最も大きな表面積を有しており、使用する粉体の性質によってコンクリートの性質は顕著に影響される。使用粉体によるコンクリートの物性変化としては、高粉末度の高炉スラグ微粉末を使用した時、単位水量がそれほど増加しないことなどがあげられる。使

用粉体材料の物理的性質に基づいてコンクリートの流動性やブリーディング性状を制御するためには、コンクリート中の粉体粒子が水と接した時の流動特性や保水特性を検討し、材料の違いによるコンクリートへの影響を定量的に把握する必要があると思われる。

粒度分布や粒子間空隙と水の体積などの、体積に基づく粉体の性質がペースト、モルタルおよびコンクリートの流動性に及ぼす影響に関する検討としては、高流動コンクリートを対象とした、相対フロー面積比と水粉体体積比の関係による拘束水量に着目した検討<sup>1)</sup>や仮想水膜を想定した拘束水膜厚さに着目した検討<sup>2)</sup>、粉体の密充てん分布に関する検討<sup>3)</sup>が行われている。また、コンクリートのブリーディング抑制を目的として、各種の鉱物微粉末を混和した際の、ブリーディング低減効果に関する検討<sup>4)</sup>が行われている。このような体積に基づく要因に加えて、粉体粒子が粒径の小さな材料であることを考慮すると、粒子の材質に起因する影響、すなわち粒子表面が有する濡れ性などの影響を考慮することも重要となるとと思われる。

本研究は、粉体の粒度分布および粒子表面が有する

性質が、コンクリートの流動性およびブリーディング性状に及ぼす影響を、各材料ごとに定量的に表すことによって、使用材料が変化したことによるコンクリートの流動性やブリーディング性状の変化を、合理的に解釈するための基本的な考え方を示すことを目的としたものである。

## 2. 本検討における基本的な考え方

コンクリート中の材料粒子と水の相互作用を検討するにあたり、本研究では、粒子の粒径や体積と表面積の大きさとの関係を考慮して、以下に示すとおり、各材料粒子と水との関係（流動に必要な水量および重力場における保水形態）を、ペーストおよびコンクリートレベルに分けてモデル化することとした。これらのモデルは、コンクリートを製造する際に実務上必要な、材料ごとの見かけの流動必要水量と保水量を工学的に評価することを目的としたものである。

### (1) ペーストレベルにおける粉体粒子と水の関係

粉体は微粒子であるため、粒子体積に対して表面積が著しく大きく、コンクリート中で最大の表面積を有する材料である。すなわち、粒子表面の性質がコンクリートの流動性およびブリーディング性状に最も大きな影響を及ぼす材料であると考えられることができる。

本研究においては、各種粉体の粒径や置換率による粒度分布の変化を表面積の変化として表現することとした。そして、ペーストが一定の流動性を示すために必要な粉体の単位表面積あたりの水量を指標とすることによって、各種鉱物微粉末の種類や粒径に起因する粒子表面の性質の違いを表現することとした。また、各粉体の重力加速度場における保水量についても粒子表面積を指標として整理し、各粉体の単位表面積あたりの保水量を整理することによって、粉体種類による保水量の違いを定量的に表すこととした。これは、粒子がその表面で水と接し、その粒子表面の性質によって水との作用が異なってくることから、一般的に行われている、粉体材料の体積に対する水の体積を指標とするのではなく、表面積を指標とすることによって種類による影響をより直接的に考察するためである。

### (2) コンクリートレベルにおける骨材と水の関係

コンクリートのブリーディングに関しては、上述の粉体粒子が保有する水量に加えて、細・粗骨材粒子によって拘束または上昇を抑制される水量についても検討することとした。細骨材粒子と粗骨材粒子の粒径の違いに着目し、それぞれの粒子が水を拘束する形態を

以下の2通りとした。

細骨材粒子は、粉体粒子と類似して、粒子体積に対して表面積が比較的大きいものと考えた。したがって、細骨材の表面積が水を拘束する支配的な要因であると判断し、粉体の場合と同様に粒子表面積を指標として拘束する水量（以下、拘束水量）を検討することとした。

一方、粗骨材粒子は、粒子体積に対して表面積が非常に小さい。したがって、粒子表面が水を拘束することによる影響に比較して、ブリーディング水の上昇経路を粒子の投影面が遮断して、水の上昇をブロックすることの影響が卓越すると考えた。このため、粗骨材粒子については、粒子の2次元投影面積を指標として、粒子投影面積が上昇を抑制する水量（以下、ブロック水量）を検討することとした。

### (3) 検討の対象

検討対象のペースト、モルタルおよびコンクリートは、鉱物微粉末の使用効果が顕著なものとして実績の多い次の2ケースとした。

①粉体系高流動コンクリートを対象としたペーストおよびコンクリートの流動性に関する検討<sup>9)</sup>（以下、シリーズ1）

②軟練りコンクリートを対象とした粉体の保水性とコンクリートのブリーディング性状に関する検討（以下、シリーズ2）

## 3. 実験方法

### (1) 使用材料

粉体系高流動コンクリートを対象とした検討（シリーズ1）では、表-1上段に示すとおり、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、混和材として使用する鉱物微粉末は、高炉スラグ微粉末（記号：B）、フライアッシュ（記号：F）および石灰石微粉末（記号：L）の3種類とした。各鉱物微粉末の粉末度は、セメント粒子と同程度（ブレン値：0.4m<sup>2</sup>/g程度）およびセメント粒子に比較して粉末度の大きなもの（ブレン値：0.6～0.8m<sup>2</sup>/g）の2水準とした。

軟練りコンクリートを対象とした検討（シリーズ2）では、表-1下段に示すとおり、普通ポルトランドセメント（記号：C2）高炉スラグ微粉末（記号：B42、B62）およびフライアッシュ（記号：F42、F62）を使用し、粉末度は高炉スラグ微粉末およびフライアッシュともに、ブレン値で0.4および0.6m<sup>2</sup>/g程度とした。

図-1に示す各粉体の粒度分布は、レーザ回折式粒度分布測定装置を用いて測定した。この体積粒度分布から粒子形状を球と仮定したときの粉体の表面積を式(1)

表-1 使用粉体の物理的性質

シリーズ	粉体の種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	強熱減量 (%)	ブレン比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	BET比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	粒度分布による 比表面積(m <sup>2</sup> /g)
①	普通ポルトランドセメント	C	3.15	—	0.3160	-	0.1493
	高炉スラグ微粉末	B4	2.91	—	0.4160	-	0.3427
		B8	2.91	—	0.8410	-	0.7385
	フライアッシュ	F4	2.29	1.1	0.4000*	-	0.4598
		F6	2.28	0.9	0.6000*	-	0.6254
	石灰石微粉末	L4	2.71	—	0.4400*	-	0.3712
	L8	2.71	—	0.7500*	-	0.6046	
②	普通ポルトランドセメント	C2	3.16	—	0.3320	0.8396	0.2584
	高炉スラグ微粉末	B42	2.91	—	0.4090	0.8847	0.3679
		B62	2.91	—	0.5630	1.2488	0.5069
	フライアッシュ	F42	2.22	3.3	0.4350	2.6399	0.3556
		F62	2.41	2.1	0.5430	1.6932	0.7609

\*概略値

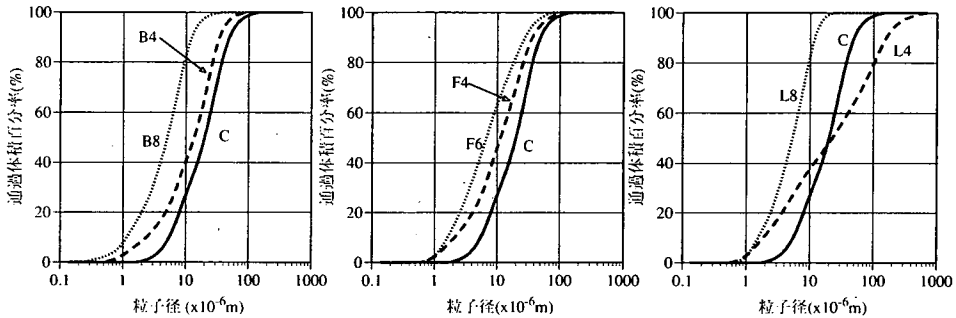


図-1 粉体材料の粒度分布 (シリーズ1)

によって計算した。

$$S = \sum \left\{ \frac{f \cdot V}{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{di}{2}\right)^3} \cdot 4\pi \left(\frac{di}{2}\right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここに、S：表面積 (m<sup>2</sup>)、di：粒子直径 (m)、f：体積粒度分布における粒子径 di (m) の粒子の頻度、V：粒子の絶対容積 (m<sup>3</sup>)

シリーズ2の粉体材料に関しては、窒素吸着法によるBET多点法の比表面積も測定した。これらの結果は、表-1中では、各粉体 1g 当たりの比表面積として示されており、表-3および表-4に示すコンクリート配合中では、各配合で使用する混合粉体の絶対容積1リットル当たりの表面積として示されている。

細骨材は、シリーズ1では、奥多摩産砂岩砕砂 (表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>、F.M.：2.90) および富津産山砂 (表乾密度：2.58g/cm<sup>3</sup>、F.M.：1.51) を質量比で8：2で混合したものを使用し、シリーズ2では、八王子産砕砂 (表乾密度：2.69g/cm<sup>3</sup>、F.M.：2.94) と富津産山砂 (表乾密度：2.61g/cm<sup>3</sup>、F.M.：1.64) を質量比で8：2で混合したものを使用した。

粗骨材は、シリーズ1では、奥多摩産砂岩砕石 2005

(表乾密度：2.65g/cm<sup>3</sup>、実積率：61.6%) を使用し、シリーズ2では、八王子産砂岩砕石 2005 (表乾密度：2.71g/cm<sup>3</sup>、実積率 60.4%) を使用した。シリーズ2で使用した粗骨材に関しては、各粒径ごとに画像解析装置によって粒子40個の投影面積を測定し、この結果の平均値と体積粒度の頻度分布から粗骨材の単位体積当たりの投影面積を算出した。

シリーズ1および2における、ペーストやコンクリートの流動性およびコンクリートのブリーディング性状は、コンクリートの練上がり温度や試験室温度に顕著に影響されるため、全ての材料は20℃の恒温室内で保管し、ペーストおよびコンクリートの練上がり温度は20±1℃となるように留意した。

(2) ペーストの配合とフレッシュ時の試験方法

a) シリーズ1

流動性評価のために試験したペーストの水粉体体積比は、0.75、0.85 および 1.00 の3水準とした。各水粉体体積比において、ペーストの単位体積中の粉体体積を決定し、以下に述べる各体積置換率 (表-2 上段) でそれぞれの鉱物微粉末を使用した。異なる粒度分布および粒子表面の濡れ性状を表現するために、各鉱物微粉末の置換率は、高炉スラグ微粉末は粉体総体積の20、40 および 60%、フライアッシュは10、20 および 30%、石灰石微粉末は10 および 20%とした。なお、空気連行性

表-2 置換率の水準

シリーズ	記号	体積置換率 (vol.%)	質量置換率 (wt.%)
①	C	-	-
	B4	20, 40, 60	-
	B8	20, 40, 60	-
	F4	10, 20, 30	-
	F6	10, 20, 30	-
	L4	10, 20	-
	L8	10, 20	-
②	C2	-	-
	B42	-	20, 40, 60
	B62	-	20, 40, 60
	F42	-	10, 20, 30
	F62	-	10, 20, 30

のないポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を粉体体積に対して4.2%の一定量添加した。この高性能減水剤使用量は、粉体質量に対して約1.5%程度であり、一般的な使用量となっている。使用粉体材料がペーストの流動性に及ぼす影響を明瞭にするため、空気連行助剤は使用せず、ペースト内に粉体粒子以外の粒状体を存在させないこととした。ペーストの流動性は、JIS R 5210に規定のフローコーンを用いて、打撃なしのフロー試験によって試験した。また、B型粘度計によって各ペーストの塑性粘度を測定した。

b) シリーズ2

ブリーディングは、重力加速度および粒子密度の影響によって材料が沈降し、水が分離上昇する現象である。セメント粒子および各種鉱物微粉末粒子が、重力加速度場において保有できる水量の定量化を目的として、JIS A 1802に規定の遠心脱水機を用いて、ペーストの遠心脱水試験を行った。ペーストに作用させる加速度は、実際の重力場と同程度である必要があると考え、遠心脱水機の回転数を約100rpm(約10m/s<sup>2</sup>)とした。脱水時間は、凝結の影響等を考慮して0～60分間とした。

単位ペースト体積当たりの保水量は、図-2に示す試験容器を使用して、ペーストの単位水量、脱水前のペーストの質量、ペーストと容器の質量および脱水後のペーストと容器の質量から式(2)により算出した。

$$W_{rel} = W_{liq} - \frac{(W_1 - W_2)}{V_{pu}} \quad (2)$$

ここに、 $W_{rel}$ ：ペースト 1L 当たりの保水量 (g)、 $W_{liq}$ ：脱水前のペースト 1L 中の液体の質量 (g)、 $W_1$ ：脱水前の容器とペーストの質量 (g)、 $W_2$ ：脱水後の容器とペーストの質量 (g)、 $V_{pu}$ ：脱水前のペーストの体積 (L)

予備試験<sup>6)</sup>において、異なる2水準の水粉体質量比の配合条件で、各種の粉体を単体で用いたペーストの遠心脱水試験と、セメントを各鉱物微粉末で置換した混合粉体ペーストの遠心脱水試験を実施した。この結果、

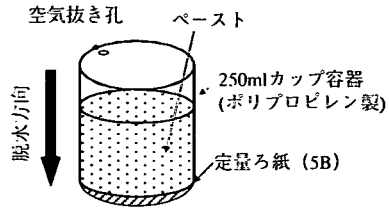


図-2 ペーストの遠心脱水容器

ペーストの保水量は、混合粉体ペーストの場合と各粉体を単体で用いたペーストの場合で異なるが、混合粉体ペーストの保水量は、各粉体を単体で試験したときの単位表面積当たりの保水量と混合粉体ペースト中の各粉体の表面積によってほぼ計算できることがわかった。すなわち、ペーストの見かけの保水量は混合粉体ペーストの場合と、各鉱物微粉末を単体で使用した場合とで異なるが、各粉体の単位表面積当たりの保水量は、両者の場合で同等となっていることがわかった。また、十分に脱水されたペーストに関しては、水粉体質量比が異なっても、各粉体の単位表面積当たりの保水量の結果に影響がないことがわかった。このため、本研究で遠心脱水試験に供するペーストは、水粉体質量比を0.55とし、各粉体を単体で用いることとした。また、リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする減水剤を粉体質量に対して0.25%の一定量添加した。

(3) シリーズ1における粉体系高流動コンクリートの配合およびフレッシュ時の試験

対象とする粉体系高流動コンクリートは、自己充填性のランク2のもの<sup>7)</sup>とし、表-3に示すとおり、ランク2のコンクリートの標準的な値を考慮して、水粉体体積比は0.9、単位粗骨材絶対容積は0.310m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>(単位粗骨材かさ容積:0.503m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)の一定とした。鉱物微粉末は、(2)a)のペーストに対する検討と同一の種類および置換率で使用した。また、高性能AE減水剤はペースト試験で用いたものと同じものとし、その使用量は粉体体積に対して4.2%一定とした。各配合は、ランク2の自己充填コンクリートに対する品質要求値であるスランプフロー650±50mm、500mmフロー到達時間3～15秒、U形充填高さ300mm以上を満足する配合となるように単位水量を変化させた。また、空気連行助剤を目標空気量(4.5±0.5%)となるように配合ごとに調整した。

コンクリートの流動性および材料分離抵抗性は、JIS A 1150に規定のスランプフローおよび500mmフロー到達時間によって試験し、間げき通過性は、JSCE-F511に規定のU形充填装置(障害R2)によって試験した。なお、各配合の500mmフロー到達時間の試験結果は、

表-3 シリーズ1における高流動コンクリートの配合

記号	Gmax. (mm)	V <sub>w</sub> /V <sub>p</sub>	W/(C+F)	air (%)	V <sub>c</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混合粉体 1Lの表面積 (m <sup>2</sup> /L)
						W	C	F	S	G	SP	
B4-20	20	0.9	0.289	4.5	0.310	161	452	104	802	822	7.889	575.7
B4-40	20	0.9	0.294	4.5	0.310	156	329	202	830	822	7.644	681.1
B4-60	20	0.9	0.299	4.5	0.310	148	208	287	874	822	7.252	786.5
B8-20	20	0.9	0.289	4.5	0.310	160	449	104	807	822	7.840	806.1
B8-40	20	0.9	0.294	4.5	0.310	158	333	204	818	822	7.742	1141.8
B8-60	20	0.9	0.299	4.5	0.310	166	233	322	774	822	8.134	1477.6
F4-10	20	0.9	0.293	4.5	0.310	168	531	43	763	822	8.232	528.6
F4-20	20	0.9	0.301	4.5	0.310	158	444	80	818	822	7.742	586.9
F4-30	20	0.9	0.310	4.5	0.310	152	374	116	852	822	7.448	645.1
F6-10	20	0.9	0.293	4.5	0.310	161	509	41	802	822	7.889	565.9
F6-20	20	0.9	0.302	4.5	0.310	160	449	81	807	822	7.840	661.5
F6-30	20	0.9	0.311	4.5	0.310	154	379	117	841	822	7.546	757.0
L4-10	20	0.9	0.316	4.5	0.310	162	512	49	796	822	7.938	523.9
L4-20	20	0.9	0.356	4.5	0.310	156	438	94	830	822	7.644	577.5
L8-10	20	0.9	0.316	4.5	0.310	160	506	48	807	822	7.840	587.2
L8-20	20	0.9	0.356	4.5	0.310	162	455	98	796	822	7.938	704.0

表-4 シリーズ2における軟練りコンクリートの配合

配合 No.	置換率 (wt.%)	W/B	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混合粉体1Lの 表面積(m <sup>2</sup> /L)
					W	C	F	S	G	減水剤	
C2	0	0.65	43	5	184	283	0	776	1045	B×0.3%	2653
B4-20-2	20	0.65	43	5	182	224	56	779	1047	B×0.3%	2636
B4-40-2	40	0.65	43	5	179	165	110	781	1052	B×0.3%	2620
B4-60-2	60	0.65	43	5	176	108	162	785	1056	B×0.3%	2604
B6-20-2	20	0.65	43	5	180	222	55	781	1052	B×0.3%	2863
B6-40-2	40	0.65	43	5	179	165	110	781	1052	B×0.3%	3065
B6-60-2	60	0.65	43	5	178	110	164	781	1052	B×0.3%	3261
F4-10-2	10	0.65	43	5	180	249	28	779	1048	B×0.3%	3091
F4-20-2	20	0.65	43	5	178	219	55	779	1047	B×0.3%	3495
F4-30-2	30	0.65	43	5	174	187	80	781	1051	B×0.3%	3868
F6-10-2	10	0.65	43	5	180	249	28	780	1050	B×0.3%	2835
F6-20-2	20	0.65	43	5	177	218	54	782	1053	B×0.3%	3006
F6-30-2	30	0.65	43	5	174	187	80	785	1056	B×0.3%	3167

3.3～6.9秒であり、平均値は5.1秒であった。

#### (4) シリーズ2における軟練りコンクリートの配合とフレッシュ時の試験

シリーズ2で試験したコンクリートの配合を表-4に示す。シリーズ1とは異なり、各鉱物微粉末は、セメントを質量置換する方法で使用した。置換率は、表-2のとおり、高炉スラグ微粉末(記号:B42およびB62)の場合、無混和の場合のセメント質量の20,40および60%、フライアッシュ(記号:F42およびF62)の場合、10,20および30%とした。また、リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とするAE減水剤を粉体質量に対して0.3%の割合で使用した。目標スランプは18cmとし、W/B(水結合材質量比)を0.65の一定、目標空気量を5.0±0.5%として配合ごとに単位水量を変化させた。なお、コンクリートのブリーディング試験は、JISA 1123に従って実施した。

モルタル中の細骨材粒子が拘束する水量を検討するため、表-4のコンクリートのモルタル部を対象として、(2)bの場合と同様に、約10m/s<sup>2</sup>の加速度が作用する条件で、遠心脱水試験を実施した。モルタルの保水量に変化がなくなった時の単位モルタル体積当たりの保水量

から、モルタル中に含まれる各粉体粒子の保水量を差し引いて細骨材粒子の拘束水量を算出し、細骨材の単位容積あたりの拘束水量および細骨材粒子形状を球としたときの細骨材の単位表面積あたりの拘束水量を計算した。

## 4. 結果および考察

### (1) 鉱物微粉末を混和したペーストの流動性と粘性 a)流動性

各鉱物微粉末を使用したペーストの水粉体体積比とフローの関係を図-3に示す。本研究の範囲では、低水粉体体積比(0.75)では、いずれの鉱物微粉末を使用した場合でも、鉱物微粉末の置換率が大きい方が、ペーストのフローが増加している。そして、水粉体体積比の増加に伴い、鉱物微粉末の種類や置換率がペーストのフローに及ぼす影響は不明瞭となる。この現象においては、粉体種類の変化に伴う粒子表面の性質変化によって混和剤の吸着特性が変化することや、粒子形状による影響も考えられるが、同一種類の粉体の置換率がペーストのフローに及ぼす影響に着目すれば、

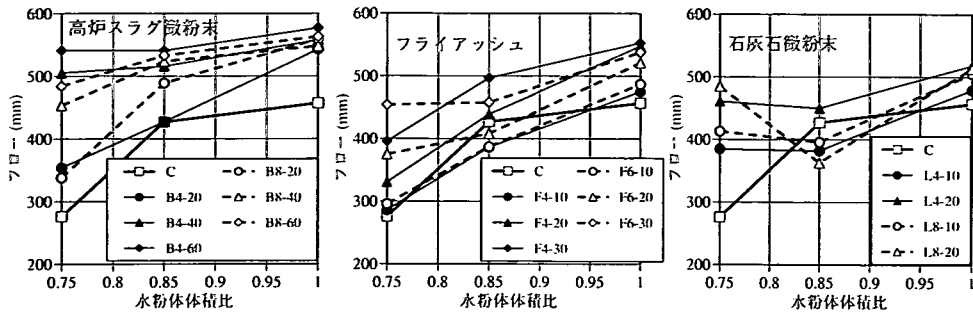


図-3 水粉体体積比とペーストのフロー

ペースト内に存在する水量による影響が大きいものと考えられる。すなわち、低水粉体体積比では、粒子表面を覆うための水量が少ないため、粒子表面の性質や粒度分布による影響が顕著となり、逆に高水粉体体積比では、粒子間に十分な水が存在するため、粒子の物理的性質よりも絶対的な水量の影響が卓越するためと推察される。しかし、図-3においては、各鉱物微粉末ごとの粒子表面の性質の変化や粒度分布の影響は、明確とは言えない。

b)粘性

一般に、ペーストのような固体粒子と水とで構成される混合物の粘性は、混合物中の固体粒子体積濃度によって支配される。本研究では、セメントペースト中に異質の表面を有する粉体が混入し、粒度分布が変化することとなるため、固体粒子の体積濃度によってペーストの粘性が一定となるか確認することとした。図-4にペースト1リットル中の粉体の総表面積とペーストの塑性粘度の関係を示す。ペーストの塑性粘度を粉体の総表面積を指標として整理したのは、鉱物微粉末の置換による粒度分布の変化を表面積の大きさによって表現したためである。図-4からは、鉱物微粉末の種類および置換率に関わらず、高水粉体体積比(0.85および1.00)のペーストでは、体積濃度に応じて、ペーストの塑性粘度がほぼ決定されていることがわかる。逆に、低水粉体体積比(0.75)の場合、固体粒子の体積濃度が一定であっても、鉱物微粉末の種類や置換率によってペーストの塑性粘度は顕著に影響を受けることがわかる。特に、高炉スラグ微粉末を使用した場合(図中丸印)の塑性粘度の低下が顕著であり、高粉末度の高炉スラグ微粉末を用いた場合は、ペースト中の粉体表面積が著しく増加するにも関わらず、塑性粘度は小さい結果となっている。鉱物微粉末の置換率が同一の場合でも、塑性粘度は異なっており、鉱物微粉末の種類や粒度がペーストの塑性粘度にも顕著に影響を及ぼしていることがわかる。

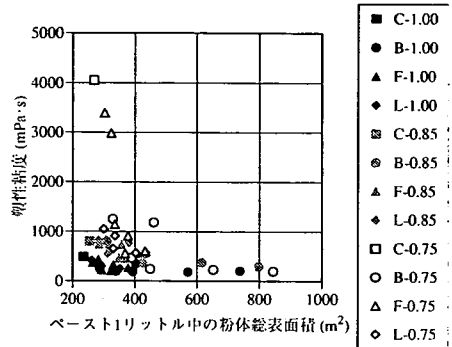


図-4 粉体の表面積とペーストの塑性粘度

(2) ペーストの流動性に及ぼす鉱物微粉末の影響

a)粉体の単位表面積当たりの水の体積を指標とした整理

前節で述べたとおり、ペーストの流動性は、使用する鉱物微粉末の種類や置換率によって影響を受けている。粉体粒子はその表面で水と接し、粒子の物理的性質と水との相互作用によってペーストの流動性が変化している。すなわち、鉱物微粉末の種類や置換率によるペーストの流動性への影響を整理するためには、粒子表面積に対して存在している水量を把握し、単位表面積当たりの水量とペーストの流動性の関係を整理することが合理的であると思われる。しかし、現在、粉体粒子の表面積を測定する方法は複数存在するが、ペースト中において水に対する粉体粒子の表面積を得るための合理的な方法を決定することはできない。このため、ここでは使用粉体の種類および置換率によるペーストのフローへの影響を定量的に評価するために、図-3のデータを各粉体の粒度分布から求めた比表面積と単位水量を基に、図-5に示すように、ペースト中の粉体の単位表面積当たりの水の体積とペーストのフローの関係で整理することとした。粉体の単位表面積当たりの水の体積を指標とすると、鉱物微粉末の置換によるペーストのフローの増大効果が明瞭となり、同一のフローとなるために必要な粉体の単位表面積当たりの水の体積は、鉱物微粉末の置換率の増加に伴って、ほぼ平行な関係で減少することがわかる。また、この水量の減少程度は、同一種類の鉱物微粉

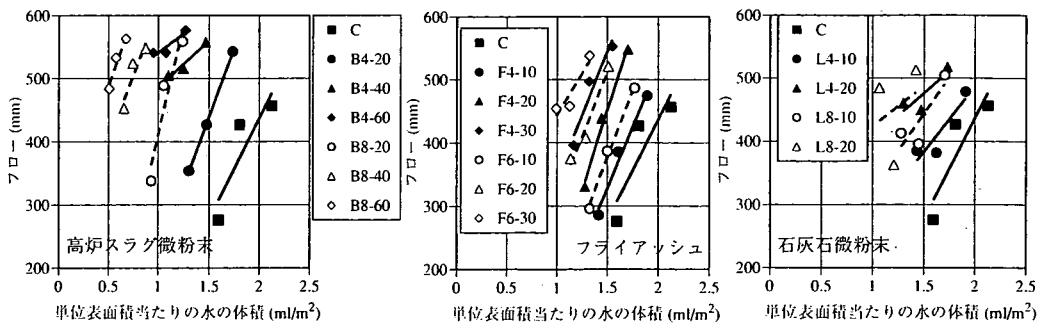


図-5 粉体の単位表面積当たりの水量とペーストのフロー

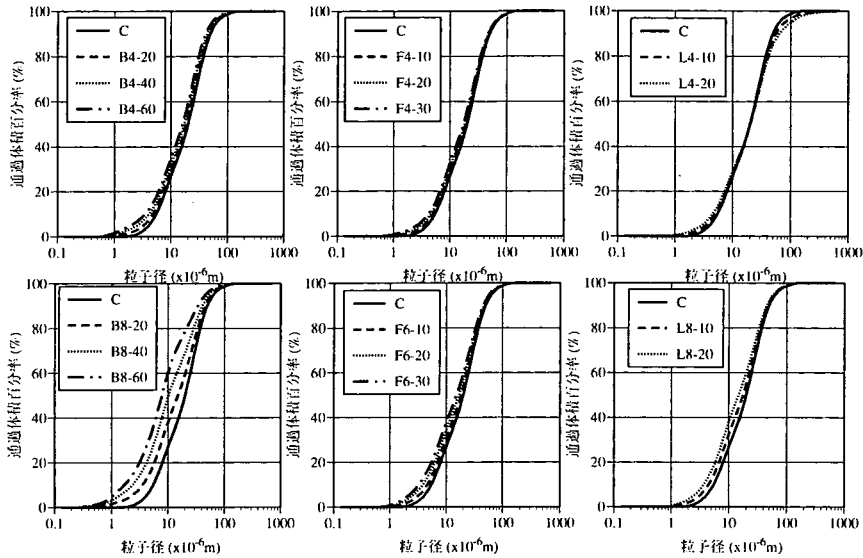


図-6 混合粉体の粒度分布

末を用いた場合でも、粉末度の大きなものを用いた場合、顕著となるのがわかる。このように、粒子形状を球と仮定しているにも関わらず、粉体の単位表面積当たりの水の体積とペーストのフローの関係で整理することで、鉱物微粉末の置換による影響が明確に表されるのは、粉体の表面積に対する水の体積が、ペーストの流動性に直接的に影響していることを示しているためと考えられる。

b)粉体材料の粒度分布

一方、粉体全体の粒度分布は、各鉱物微粉末の置換によって、図-6に示すとおりに変化している。この粒度分布の変化が、粉体粒子の3次元の充てん状態にどの程度影響するかは明確でないが、ブレン値 $0.4\text{m}^2/\text{g}$ 程度の鉱物微粉末を用いた場合は、粒度分布に顕著な変化はなく、ブレン値 $0.6 \sim 0.8\text{m}^2/\text{g}$ 程度の鉱物微粉末を用いた場合で、粒度分布が細粒側に変化していることがわかる。図-6で低粉末度の石灰石微粉末(LA)を用いた場合を例に考えると、混合粉体の粒度分布はセメ

ントの粒度分布とほぼ同等にも関わらず、ペーストの流動性は変化している。このことは、粉体粒子の充てん構造のみにペーストの流動性が支配されているのではなく、粒子表面の性質にも影響されていることを示していると考えられる。このようなことから、本研究では、鉱物微粉末の種類および粉末度ごとに、各鉱物微粉末が同一の流動性を示すために必要な水の体積を定量化することとした。

c)鉱物微粉末置換によるペーストの流動性に対する影響の評価

図-5における現象を定量的に表現するための手法として、次のとおり、各鉱物微粉末の表面の性質をセメント粒子の表面を基準として数値化することとした。

図-7に示すように、各混合粉体を用いたペーストがある流動性を示す時に、セメント粒子の流動特性線上に重なるために必要なx軸の値を考察することによって、セメント粒子の表面を基準とした評価ができる。本研究では、混合粉体としての見かけの流動性を評価す

るのではなく、各鉱物微粉末がペーストの流動性に及ぼす影響を評価することを目的としているため、式(3)に示すとおり、分母の鉱物微粉末の表面積 ( $S_a$ ) に係数  $\beta$  を導入し、各配合中の液体体積に対して、セメント単体を使用した場合の流動特性線（最小自乗法近似した直線式）と同一となるための各鉱物微粉末表面積の減少の割合を計算することとした。

$$f = a \cdot \frac{V_{liq}}{S_c + \beta \cdot S_a} + b \quad (3)$$

ここに、 $f$ : ペーストのフロー(mm),  $a$ : セメントのみを使用した時の直線式の傾き,  $V_{liq}$ : ペースト配合中の液体の体積(ml),  $S_c$ : 配合中のセメントの表面積( $m^2$ ),  $\beta$ : 鉱物微粉末の表面積のセメント表面積への換算係数,  $S_a$ : 配合中の鉱物微粉末の表面積( $m^2$ ),  $b$ : セメントのみを使用した時の直線式のy切片

このように、各鉱物微粉末の性質を単独で評価することによって、同一の鉱物微粉末を使用する場合、置換率の変化による再試験の必要性はない。そして、係数  $\beta$  はペーストが所定の流動性を示すために、各鉱物微粉末の表面積がセメント粒子と同じ水量を必要とする場合、実際の表面積の何倍に表されるかということを示しており、ペーストの流動性に関して、各鉱物微粉末の表面積をセメント粒子の表面積として換算するものである。係数  $\beta$  の計算結果は、表-5に示すとおりであり、本実験で使用した鉱物微粉末は、セメント粒子の表面積に換算すると実際の表面積の約10~30%程度に計算される。すなわち、同一の水量に対しては、鉱物微粉末の表面積は、セメントの表面積に換算すると、最大で約3割程度の大きさでしかなく、セメント粒子と比較して単位表面積当たり少ない水量で流動できる粉体であることが定量的に示されている。係数  $\beta$  の計算においては、粉体粒子の形状を球と仮定した場合の表面積がベースとなっている。また、使用するセメントの成分の変動や高性能減水剤の種類等によっては、基準となるセメントのみを用いたペーストの流動特性も変化することが予想される。したがって、現段階で係数  $\beta$  の値は、ペーストの流動性に対する各鉱物微粉末の特性を示す絶対的かつ普遍的な意味を持つものではないが、本研究のような過程で整理・検討することによって、粉体材料が変化した場合の流動性変化に対する比較的合理的な整理および解釈ができるものと考えられる。

(3) コンクリートの流動性に対する鉱物微粉末の影響  
所定のスランプレフロー (650 ± 50mm) を得るためのコンクリートの単位水量を、スランプレフローで除して、コンクリートを100mm流動させるために必要な水量を

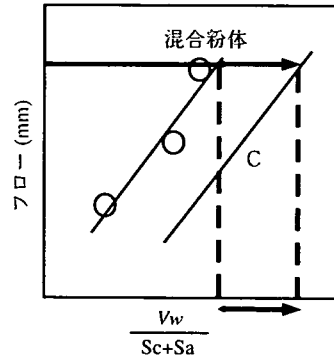


図-7 粉体種類による影響の評価 (模式図)

表-5 係数  $\beta$  の計算結果

種類	$\beta$
B4	0.27
B8	0.12
F4	0.33
F6	0.23
L4	0.20
L8	0.09

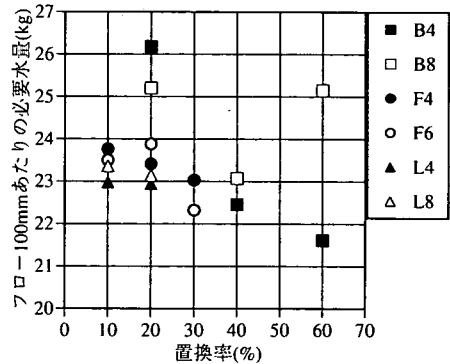


図-8 鉱物微粉末の置換率とコンクリートの流動に必要な水量

算出した。各鉱物微粉末の置換率とフロー100mm当たりの必要水量の関係を図-8に示す。本実験の範囲では、高炉スラグ微粉末 (B8) を用いた場合以外では、置換率の増大にともなって、フロー100mm当たりの必要水量が減少する傾向となった。

各鉱物微粉末の表面の性質による影響を明確にするため、ペーストにおける係数  $\beta$  を用いて、式(4)に示すように、コンクリート1 $m^3$ 中の全粉体のセメント換算表面積を算出した。

$$S_{eq} = S_c + \beta \cdot S_a \quad (4)$$

ここに、 $S_{eq}$ : セメント換算表面積( $m^2$ ),  $S_c$ : コンクリート1 $m^3$ 中のセメントの表面積( $m^2$ ),  $S_a$ : コンクリート1 $m^3$ 中の鉱物微粉末の表面積( $m^2$ )



この換算表面積とコンクリートのフロー100mmに必要な水量の関係で整理すると図-9のようになる。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの一部にばらつきがあるものの、ほぼ全ての配合について、換算粉体表面積の増加にともなってコンクリートのフロー100mm当たりの必要水量が同一の直線関係で増加していることがわかる。すなわち、ペーストの流動性に対する粉体の表面特性を反映した表面積換算係数 $\beta$ を導入することにより、粉体系高流動コンクリートの流動性を整理することができ、粉体系高流動コンクリートの流動性がペースト部の流動性に顕著に影響されていることが示された。

このように、本検討の範囲では、様々な粉体材料の表面が有する性質を、粒子表面積に着目して検討することによって、定量的に表すことができることが示され、粉体材料の種類や置換率が変化した場合の、ペーストおよびコンクリートの流動性変化を比較的合理的に説明できることが示された。しかし、指標とする表面積の妥当性や、製造ロットの違いなどによる同種類の粉体中の品質変動による影響については、さらに検討を行う必要がある。

#### (4) 粉体材料の保水性の定量化

ペーストの遠心脱水時間と単位ペースト体積当たりの保水量の関係を図-10に示す。各ペーストについて、保水量がほぼ一定となる脱水時間がわかる。すなわち、重力場におけるペーストの保水量は、一定の値に収束することがわかるが、この図-10における保水量には、各粉体の種類、体積および粒度の影響が含まれている。粉体材料の種類による保水性状の変化を明確にするため、BET比表面積と配合から、ペースト中の粉体の表面積を算出し、各配合における単位ペースト体積当たりの保水量を粉体の表面積で除して、単位粉体表面積当たりの保水量を算出した。脱水時間と単位粉体表面積当たりの保水量で整理すると、図-11のとおりとなる。各粉体の単位表面積当たりの保水量は、粉体の種類ごとに一定の値に収束することがわかる。したがって、表-6に示すとおり、粉体種類および粉末度ごとの脱水時間60分後における単位表面積当たりの保水量を重力加速度下における各粉体の保水量とした。このように、各粉体の単位表面積当たりの保水量は、BET比表面積をベースとして計算した。これは、粒子形状を考慮すると窒素吸着による表面積測定が信頼性が高いと考えたためである。しかし、表-1に示したとおり、比表面積の数値は測定方法や計算方法ごとに異なっており、また、減圧下における窒素吸着による表面積が、実際の水に対する表面積と同一とは限らないという課題がある。特にF42においては、窒素吸着に

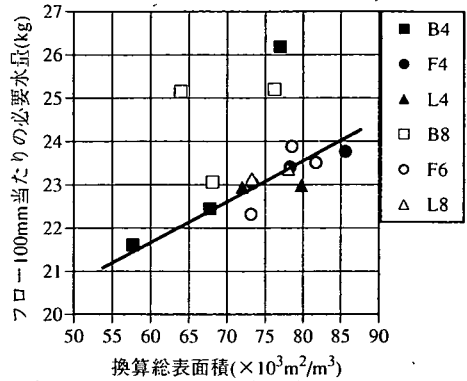


図-9 粉体のセメント換算総表面積とコンクリートの流動に必要な水量

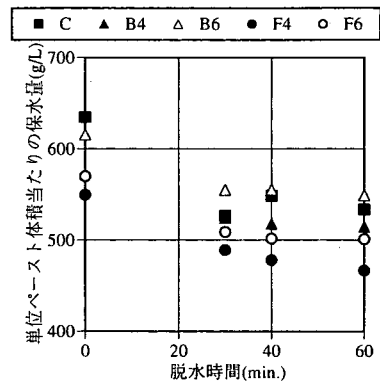


図-10 脱水時間と単位ペースト体積当たりの保水量 (シリーズ2)

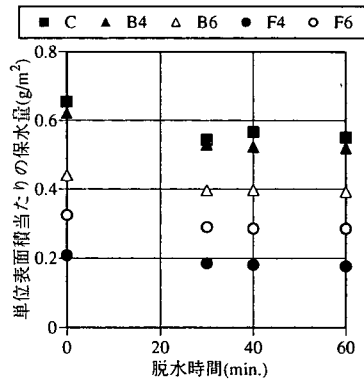


図-11 脱水時間と単位粉体表面積当たりの保水量 (シリーズ2)

表-6 各粉体の単位表面積当たりの保水量

記号	単位粉体表面積 当たりの保水量(g/m <sup>2</sup> )
C2	0.551
B42	0.520
B62	0.393
F42	0.177
F62	0.286

よって測定した比表面積とその他の手法によって測定した比表面積の大小関係が異なった傾向を示している。このことは、F42が粒径の大きなフライアッシュであるため、粒子内部の空隙の影響と推察されるが、粒子構造や表面に接触する物質に応じた合理的な表面積の評価方法についても検討する必要があると思われる。なお、本研究における以降の検討では、単位体積のモルタルおよびコンクリート中における粉体の保水量として比較・検討するため、各粉体の単位表面積当たりの保水量に配合中の表面積を乗じ、配合中における粉体材料の保水量として取扱うことから、このような表面積測定方法による影響は含まれないこととなる。

### (5) 細骨材の拘束水量の評価

モルタルの遠心脱水試験の結果では、前節におけるペーストの場合と同様に、保水量が一定となる脱水時間が存在し、モルタルに関しても、重力加速度場において保有できる水量が一定の値に収束することがわかった。各粉体材料のBET比表面積と配合から、単位モルタル体積中の各粉体材料の表面積を計算し、この表面積と前節で決定した各粉体の単位表面積当たりの保水量の積からモルタル中の粉体粒子が保有する水分量を計算し、単位モルタル体積当たりの保水量から差し引くと、細骨材粒子が拘束する水量を計算することができる。

モルタル中の細骨材の体積は、配合ごとに異なっているため、単位容積のモルタル中の各細骨材の体積と粒度分布(体積頻度分布)から粒子形状を球と仮定した

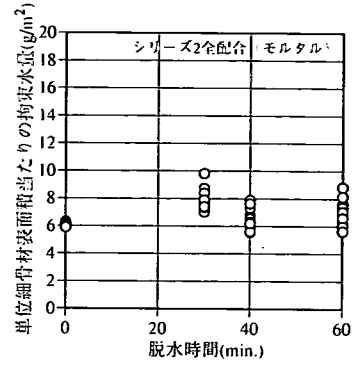


図-12 細骨材の単位表面積当たりの拘束水量 (シリーズ2: 全配合)

ときの細骨材粒子の表面積を計算し、細骨材の単位表面積当たりの拘束水量を計算した。この結果、図-12に示すとおり、細骨材の単位表面積当たりの拘束水量は、使用する粉体材料の種類および脱水時間に関わらず、ほぼ一定の値となった。これは、細骨材粒子の粒径が粉体粒子に比較して大きいことによるものと思われる。本研究においては、全モルタルの脱水時間60分後の細骨材の単位表面積当たりの拘束水量(5.65~8.83g/m<sup>2</sup>)の平均値(6.95g/m<sup>2</sup>)を細骨材の単位表面積当たりの拘束水量とした。

### (6) コンクリートのブリーディング性状とモルタルの保水量による整理

シリーズ2におけるコンクリートのブリーディング性状は、図-13に示すとおりであり、本研究の範囲では、セメントのみを使用した配合と比較して、各鉱物微粉

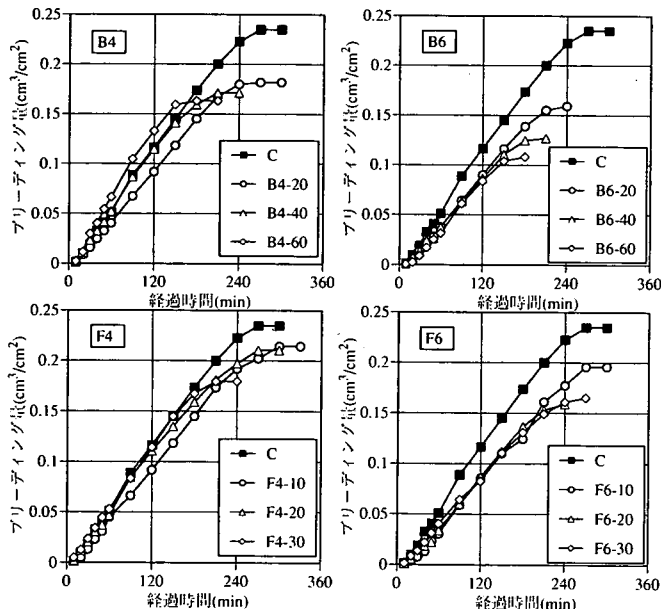


図-13 コンクリートのブリーディング性状 (シリーズ2)

末を使用した場合、その置換率の増加に伴ってブリーディング量が減少することがわかる。また、鉱物微粉末の粉末度が高いほどブリーディング速度が低下することがわかる。これらのことは、セメントを各種鉱物微粉末で置換することによる粉体体積の増加とこれに伴う表面積の増加、また、粒度分布の変化に伴う、液体の上昇経路の大きさと複雑さの変化によるものと思われる。

(4)および(5)の検討によって、各粉体粒子および細骨材の単位表面積当たりの保水量および拘束水量が定量的に表されている。ブリーディング試験に供したコンクリートの単位体積中における、細骨材および各粉体粒子の表面積と、それぞれの拘束水量および保水量から粉体材料および細骨材が保有できる水分量を計算し、コンクリートの単位水量から差し引くことによって、粉体粒子および細骨材粒子が水を保有・拘束するとしたときのブリーディング水量の計算を行った。このコンクリート体積1リットル当たりのブリーディング水量の計算値と実測値の関係は、図-14に示すとおりであり、いずれの配合に関しても、ブリーディング水量の計算値は実測値と比較して約12g/L程度大きくなっていることがわかる。各測定点は、使用粉体材料の種類、粉末度および置換率に関わらず、同一の直線的な関係となっていることがわかる。すなわち、粉体材料については、種類、粉末度および置換率によるブリーディング水量に対する影響が良好に表現できていることを示しており、細骨材に関しては、粒子表面積による拘束水量の影響が表現できているものと思われる。

#### (7) 粗骨材の投影面積によるブロック水量の算出

図-14の実測値と計算値の差異には、粗骨材粒子下面の拘束水量の影響が大きいものと思われる。本検討で試験した配合では、単位粗骨材容積がほぼ同一であり、ブリーディング水の上昇をブロックする投影面積も同等であるため、いずれの配合に関しても、実測値と計算値の差が同等となったものと思われる。このようなこ

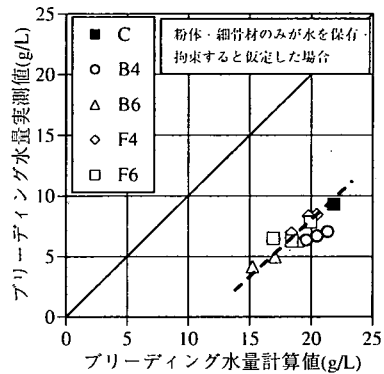


図-14 ブリーディング水量の計算値と実測値 (シリーズ2)

とから、各配合について、計算値と実測値の差の水量が、コンクリート中の粗骨材の投影面積によって上昇を抑制されるものと仮定して粗骨材の単位投影面積当たりのブロック水量を算出した。本実験で検討した各配合においては、粗骨材の単位投影面積当たりのブロック水量は、126.4~174.5g/m<sup>2</sup>となり、平均値は149.0g/m<sup>2</sup>となった。

#### (8) ブリーディング量と各材料粒子が拘束する水量

ここまでの検討で得られた結果によって、コンクリート中の各材料粒子が拘束する水量が示された。本検討で試験した各配合単位体積中で、材料粒子が拘束する水量をまとめると表-7のとおりとなる。コンクリートの使用材料中、粉体粒子が保有する水分量が、骨材粒子が拘束する水分量に比較して著しく大きいことがわかる。すなわち、コンクリートのブリーディングを考える場合、使用粉体材料の保水性に着目して検討することが合理的であることが示されている。

#### (9) ブリーディング水量の検証

前節までで述べた各材料別の水の拘束量の妥当性を検証するため、表-8に示すコンクリートについて、ブ

表-7 各材料粒子の拘束水量

配合 No.	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	粉体保有水量(kg/m <sup>3</sup> )			細骨材拘束水量(kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材ブロック水量(kg/m <sup>3</sup> )
		セメント	鉱物微粉末	粉体全体		
C2	184	130.9	0.0	130.9	31.3	12.5
B4-20-2	182	103.6	25.8	129.3	31.3	14.3
B4-40-2	179	76.4	50.7	127.1	31.5	13.8
B4-60-2	176	50.1	74.7	124.8	31.6	13.2
B6-20-2	180	102.4	27.2	129.6	31.5	12.6
B6-40-2	179	76.4	54.1	130.5	31.5	12.1
B6-60-2	178	50.7	80.6	131.3	31.5	11.1
F4-10-2	180	115.3	12.9	128.2	31.4	12.0
F4-20-2	178	101.3	25.6	126.9	31.3	11.4
F4-30-2	174	86.7	37.5	124.2	31.5	11.4
F6-10-2	180	115.3	13.4	128.6	31.4	12.1
F6-20-2	177	100.7	26.3	127.1	31.5	12.1
F6-30-2	174	86.7	38.8	125.5	31.6	10.4

表-8 細骨材率 38% のコンクリートの配合

配合No.	置換率 (wt.%)	W/B	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					減水剤
					W	C	F	S	G	
C2(38)	0	0.65	38	5	184	283	0	686	1137	B×0.3%
B4-60-2(38)	60	0.65	38	5	176	108	162	694	1150	B×0.3%
B6-60-2(38)	60	0.65	38	5	178	110	164	691	1144	B×0.3%
F4-30-2(38)	30	0.65	38	5	174	187	80	691	1144	B×0.3%
F6-30-2(38)	30	0.65	38	5	174	187	80	694	1149	B×0.3%

リーディング試験を実施し、計算値と実測値の整合性について検討することとした。表-8に示した配合は、シリーズ2で使用した各鉱物微粉末を最大置換率で使用したものとし、粗骨材の投影面積を強制的に変化させるために、s/aを38%とし、粗骨材容積を変化させたものとなっている。

各配合中の粉体表面積、細骨材表面積および粗骨材投影面積を前述の方法で算出し、粉体の保有水量、細骨材の拘束水量および粗骨材のブロック水量からブリーディング量の計算値を算出した。ブリーディング量の計算値と実測値の関係は、図-15に示すとおりであり、実測値と比較して計算値が小さい結果となった。このことは、粗骨材体積の増加によって、コンクリート中に質量の大きな粒子が増加したため、材料粒子の質量と高さによって生じる粒子の沈降力が前節までの配合(表-4)と比較して大きくなったことによるものと考えられる。したがって、コンクリートのブリーディングを合理的に整理するためには、本研究で検討した各材料粒子が拘束する水の体積に加えて、材料粒子の密度や質量に起因するブリーディングを引き起こす駆動力についても検討を行う必要があることを示唆している。

今後、粒子間空隙に着目した整理を行い、ブリーディング水の上昇経路に関する検討を加えることによって、ブリーディング速度も評価できる可能性がある。さらに、コンクリートの打込み高さ、容器や型枠との接触面積等、材料粒子の性質に起因しない部分の評価を行うことによって、コンクリートの材料の性質と構造物の作製条件に基づいて、コンクリートのブリーディングを総合的に評価できる可能性がある。

## 5. まとめ

粉体系高流動コンクリートの流動性および軟練りコンクリートのブリーディング性状に対する鉱物微粉末置換による影響を、粉体粒子の表面の性質に着目し、粉体の単位表面積当たりの水量を指標として検討した。ブリーディングに関しては、粉体粒子に加えて、細・粗骨材粒子についても粒子の拘束水量を指標として検討した。この結果、本研究の範囲で次のことがわかった。

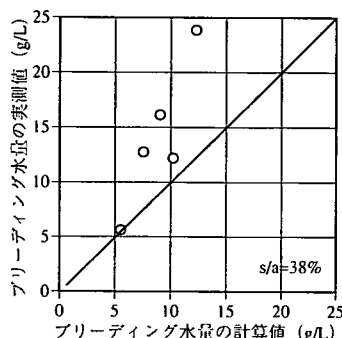


図-15 ブリーディング水量の計算値と実測値 (s/a=38%)

- (1)ペーストの流動性は、低水粉体体積比の場合、使用する粉体の種類や粒度に顕著に影響される。
- (2)ペーストの塑性粘度は、低水粉体体積比の場合、使用する粉体の種類や粒度分布等に影響される。
- (3)ペーストの流動性については、粉体材料の単位表面積当たりの水の体積を指標として整理することにより、粉体の置換による影響が明瞭となる。
- (4)ペーストの流動については、セメント粒子の表面が必要とする水量を基準とすることで、各種の鉱物微粉末の表面が必要とする水量に関する指標が定量的に表現できる。
- (5)粉体系高流動コンクリートの流動性は、ペーストの流動性に対して求めた各種鉱物微粉末の必要水量に関する指標により評価できる。
- (6)粉体の単位表面積当たりの保水量は、重力加速度程度が作用する遠心脱水によって定量的に表すことができる。
- (7)粉体粒子と細骨材粒子が水を拘束するとして計算したブリーディングの計算値と実測値の関係においては、使用する粉体の種類、粉末度および置換率による影響がなく、いずれの配合に関しても、同一の直線的な関係となる。
- (8)ブリーディング水量の計算値と実測値の差を粗骨材にブロックされる水量と考え、配合中の各材料が拘束する水量を計算すると、粉体粒子の保水性がコンクリートのブリーディングに最も影響を及ぼしていることが定量的に表される。

(9)コンクリートのブリーディングを合理的に整理するためには、材料粒子の性質による拘束水量の変化に関する検討に加えて、粒子質量や打込み高さ等のブリーディングを引き起こす駆動力に関する検討も行う必要がある。

謝辞：本研究の一部は、平成13年度東京都立大学総長特別研究費(若手奨励研究)によって実施したものであることを記す。

#### 参考文献

- 1) 枝松良展, 下川浩児, 岡村 甫: 粉体の特性とペーストのフロー値との関係, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.65-75, 1996.
- 2) 緑川猛彦, 丸山久一, 下村 匠, 桃井清至: 粉体特性の定量化手法に基づくペーストの流動性評価方法, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.99-110, 1997.
- 3) 星野清一, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機: 無機粉体の粒子特性とセメントペーストのレオロジー, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.186-191, 1996.
- 4) 庄谷征美, 杉田修一, 阿波 稔, 中道礼司: 鉱物質微粉末の保水性能とその混和によるコンクリートのブリーディング抑制について, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.368-373, 1998.
- 5) Ueno, A. and Kokubu, K.: Evaluation of influence of mineral admixtures on flowability and viscosity of cement paste and concrete, Proceedings of 2001 second international conference on engineering materials, vol.1, pp.615-624, 2001.
- 6) 田所雄治, 上野 敦, 国府勝郎: ペーストの保水性がコンクリートのブリーディング性状に及ぼす影響, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, 第5部, V-144, pp.288-289, 2001.
- 7) 土木学会: 高流動コンクリート施工指針, コンクリートライブラリー, No.93, 1998.

(2002. 6. 11 受付)

## A FUNDAMENTAL STUDY OF EVALUATION OF EFFECTS OF MINERAL POWDERS ON FLUIDITY AND BLEEDING OF CONCRETE

Atsushi UENO, Katsuro KOKUBU and Kimitaka UJI

In this study, we investigate the influence of powders on the fluidity and bleeding of two types of concretes. One is the influence of powders on the fluidity of high fluidity concrete. The other is the influence of powders on the bleeding of concrete. In our investigation, the three types of mineral powders, each of them has two finess, are used in different replacement ratio to make different particle size distribution of powders and to make different surface nature against water. Within the limits of our investigation, the surface nature of every powder is quantitatively represented based on the surface area of cement particles, also the apparent properties of every concrete are explained by the idea based on the properties of corresponding powders.