

# 高性能軽量・高流動コンクリートに関する研究

柳井 修司<sup>1</sup>・坂田 昇<sup>2</sup>・信田 佳延<sup>1</sup>・岡本 享久<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 太平洋セメント株式会社 研究本部 (〒135-8410 東京都江東区清澄 1-2-23)

人工軽量骨材コンクリート I 種に自己充てん性を付与することを目的として、水粉体容積比、モルタルの単位容積質量、軽量骨材の種類および単位量を要因として、流動性試験、充てん性試験および材料分離抵抗性試験を行った。その結果、人工軽量骨材を使用した高流動コンクリートは、骨材の密度が小さいことから、骨材の浮上りによる材料分離が生じやすいこと、適正なモルタルの粘性（水粉体容積比）、モルタルの単位容積質量および単位骨材量を選定することで、軽量骨材の特性に応じて、高流動性、自己充てん性、材料分離抵抗性を有する軽量骨材コンクリートの配合を選定できることが分かった。

**Key Words** : *high performance artificial lightweight aggregate, flowability, self compactability, material segregation*

## 1. はじめに

我が国での土木分野における人工軽量骨材コンクリート（以下、軽量コンクリートと記す）の使用は 1950 年代から始まり、1960 年代には設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup> の高強度軽量コンクリートが適用されてきた<sup>1)</sup>。しかしながら、当時の軽量骨材は吸水率が大きく、ポンプ圧送する際に十分なプレウエットングが必要であることや、凍結融解抵抗性に劣っていたことなどから、その後の需要は低迷してきた。このような状況下において、最近では人工軽量骨材の新しい製造技術<sup>2), 3)</sup>により、骨材自身の高強度化、低吸水性化が可能となってきており、施工性ならびに耐久性に優れた高性能軽量コンクリート<sup>4)</sup>の実用化が期待され始めている。

一方、近年の橋梁やシールドトンネルなどの土木構造物は、長大化、大断面化の傾向にあり、橋梁上部工やセグメント部材などの断面の縮小化と死荷重の低減が要求されている。また、このような部材には鉄筋が高密度に配置されることが多く、コンクリートには高い流動性や自己充てん性が要求されるようになってきている。したがって、軽量コンクリートに高強度性や自己充てん性を付与することは、建設コストの低減や施工の省力化を図る上で、極めて重要な意味を持つ。軽量コンクリートの高強度化に関する研究はこれまでに数多くなされており、圧縮強度 100N/mm<sup>2</sup> 程度の高強度化

が可能となっている<sup>5)</sup>。しかしながら、高流動性や自己充てん性付与に関する研究については、過去に数例の報告<sup>6), 7)</sup>がなされているものの、配合設計時の指標や流動性、充てん性の目安となる指標は未だ提案されていないのが実状である。

本研究は、軽量コンクリート I 種に自己充てん性を付与することを目的として、水粉体容積比<sup>8)</sup>、モルタルの単位容積質量、軽量骨材の種類および単位量に着目して流動性、材料分離抵抗性、自己充てん性を評価する各種試験を行い、使用材料や配合条件がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響について検討したものである。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料

使用材料を表-1 に示す。本研究では、骨材に絶乾密度および原材料の異なる 5 種類の軽量骨材を用いた。これらは流紋岩系鉱物（真珠岩）あるいは石灰灰を造粒して焼成した高性能軽量骨材<sup>2), 3)</sup>であり、従来の軽量骨材よりも吸水率が極めて小さくなっている。フライアッシュおよびシリカフュームは結合材の軽量化を図るとともに材料分離抵抗性の向上を目的として使用した。高性能 AE 減水剤には  $\beta$ -ナフタレンスルホン酸塩系のものを使用した。なお、本研究では、

表-1 使用材料

使用材料	記号	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ , 比表面積 $3,350\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	新潟産山砂 表乾密度 $2.60\text{kg}/\ell$ , 吸水率 $1.69\%$ , 粗粒率 $2.30$
人工軽量粗骨材	G09	流紋岩系真珠岩 Gmax $15\text{mm}$ , 絶乾密度 $0.94\text{kg}/\ell$ , 24h吸水率 $7.77\%$
	G10	流紋岩系真珠岩 Gmax $15\text{mm}$ , 絶乾密度 $1.06\text{kg}/\ell$ , 24h吸水率 $2.90\%$
	G11	流紋岩系真珠岩 Gmax $15\text{mm}$ , 絶乾密度 $1.15\text{kg}/\ell$ , 24h吸水率 $4.45\%$
	G13	流紋岩系真珠岩 Gmax $15\text{mm}$ , 絶乾密度 $1.27\text{kg}/\ell$ , 24h吸水率 $2.07\%$
	G18	石灰灰焼成骨材 Gmax $20\text{mm}$ , 絶乾密度 $1.78\text{kg}/\ell$ , 24h吸水率 $2.04\%$
混和材	FA	フライアッシュ 密度 $2.20\text{g}/\text{cm}^3$ , 比表面積 $3,830\text{cm}^2/\text{g}$ , 強熱減量 $2.2\%$
混和剤	SF	シリカフューム 密度 $2.20\text{g}/\text{cm}^3$ , 比表面積約 $200,000\text{cm}^2/\text{g}$
特殊増粘剤	SP	高性能AE減水剤 $\beta$ -ナフタレンスルホン酸塩系
	VIS	ウエランガム -

表-2 試験方法および測定項目

項目	摘要
スランプフロー	JSCE F503 1990
500mmフロー到達時間	JSCE規準(案)
$V_{75}$ 漏斗流下時間	JSCE規準(案)
空気量, 単位容積質量	JIS A 1128, JIS A 1116
コンクリート温度	温度計にて計測
鉛直方向材料分離評価試験	本文参照
900mm流動性評価試験	本文参照
水平方向材料分離評価試験	本文参照
3m流動性評価試験	本文参照
圧縮強度試験	JIS A 1108
ヤング係数試験	ASTM C 469-65

材料分離抵抗性の向上を目的として増粘剤ウエランガム<sup>9)</sup>を使用した併用系高流動コンクリートについて検討を行った。

(2) 試験方法および測定項目

本研究で実施した試験方法および測定項目を表-2に示す。鉛直方向材料分離評価試験とは、図-1に示すように $\phi 150 \times 300\text{mm}$ の円柱型枠を2段重ねにしてコンクリートを打ち込み、5分静置した後、上層A室、下層B室の各々から採取したコンクリートを5mmふるい上で水洗いして軽量粗骨材を取り出し、各室の粗骨材絶乾重量の比から、材料分離を評価しようとするものである<sup>10)</sup>。ここでは、B室の軽量粗骨材絶乾重量に対するA室の軽量粗骨材絶乾重量の比を鉛直分離指数と称することとした(鉛直分離指数 1.00は骨材が鉛直方向に均一に分布していることを示す)。

900mm流動性評価試験とは、図-2に示すアクリル製型枠に5秒間に約1ℓの割合でコンクリートを投入して、その流動勾配や装置内への充てん状況を評価しようとするものである。試験終了後、300mmごとに仕切り板を挿入して、前述と同様に粗骨材を取り出し、各室の粗骨材絶乾重量の比から、材料分離を評価することとした。ここでは、I室の軽量粗骨材絶乾重量に対するIII室の軽量粗骨材絶乾重量の比を水平分離指数と称することとした。また、図-3に示すようにコンクリート天端面と型枠に囲まれた全面積(斜線部)をAa、材料分離が生じて粗骨材が浮き上がり、モルタルと粗骨材が一体とならなかった部分の面積をAsとして、その面積比( $As/Aa \times 100\%$ )をモルタル未充てん率と称することとした。

3m流動性評価試験とは、図-4に示すアクリル製型枠内にコンクリートを投入し、流動距離を3mとした場合のコンクリートの充てん性、材料分離抵抗性を把握しようとするものである。

コンクリートの練混ぜは水平二軸型強制練りミキサ(容量100ℓ, 回転数60rpm)を用いて行い、練混ぜ量は60ℓとした。また、練混ぜ時間は全材料投入後

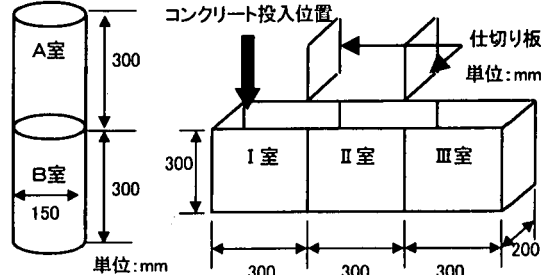


図-1 鉛直方向材料分離評価試験

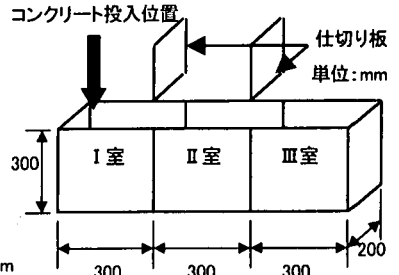


図-2 900mm流動性試験装置

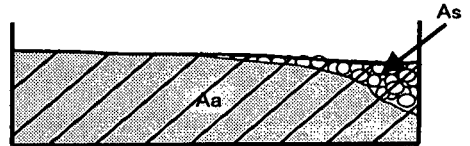


図-3 モルタル未充てん率の考え方

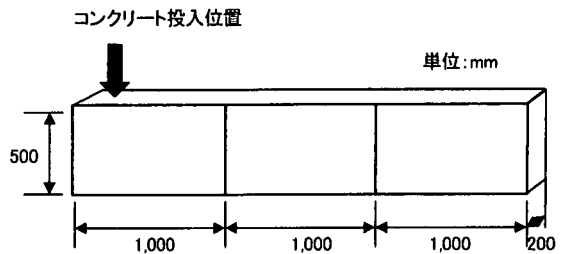


図-4 3m流動性試験装置

120秒間とした。軽量粗骨材は24時間プレプレウエティングしたものを使用した。

(3) 検討要因

本研究では以下に示す5つの要因に着目して試験を行い、それぞれの要因がコンクリートの性状に及ぼす影響について検討を行った。試験に供したすべてのコンクリートの配合を表-3に示す。

a) モルタルと粗骨材の密度差

セメントの一部をフライアッシュで置換する、ある

表-3 コンクリートの配合

No.	粗骨材	Gvol (ℓ)	Vs/Vm (%)	Vw/Vp (%)	W/C (%)	W/B (%)	置換率(%)		Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						SP (P×%)	VIS (W×%)	単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )		
							FA	SF		W	C	FA	SF	S	G			モルタル	コンクリート	
I-1	G13	400	40	90	29.6	29.6	0	0	4.5	158	533	0	0	577	508	1.80	0.05	2113	1788	
I-2					38.1	30.9	25				158	415	96	0		577		1.70	2077	1766
I-3					57.0	33.6	50				158	277	193	0		577		1.60	2008	1725
I-4					113.7	36.9	75				158	139	289	0		577		1.30	1938	1683
I-5					113.7	36.8	75				100	142	125	261		0		520	1.30	1747
II-1	G09	400	40	90	57.0	33.6	50	0	4.5	158	277	193	0	577	376	1.85	0.05	2008	1609	
II-2		350			57.0	33.6					172	302	210	0	629	329		1.60	2020	1667
II-3		300			57.0	33.5					186	327	228	0	681	282		1.60	2031	1725
II-4		270			57.0	33.6					195	342	238	0	712	254		1.60	2037	1760
III-1	G09	300	40	70	44.4	26.0	50	0	4.5	162	365	257	0	681	282	3.80	0.05	2093	1768	
III-2				80	50.9	30.0					172	344	240	0		681		2.00	2057	1743
III-3				90	56.9	33.5					186	327	228	0		681		1.60	2031	1725
III-4				100	63.5	37.5					197	310	216	0		681		1.50	2006	1707
III-5	G09	300	40	65	45.9	24.8	45	10	4.5	155	338	236	52	681	282	3.60	0.05	2089	1768	
III-6				70	49.2	26.6					162	329	229	51		681		2.70	2074	1743
III-7				80	56.5	30.5					175	310	216	48		681		2.50	2043	1725
III-8				90	63.1	34.1					186	295	205	46		681		2.20	2019	1707
IV-1A	G10	300	40	80	50.9	30.0	50	0	4.5	175	344	240	0	681	318	2.40	0.05	2057	1767	
IV-2A				90	56.9	33.5					186	327	228	0		681		2.20	2031	1749
IV-3A				100	63.5	37.5					197	310	216	0		681		1.50	2006	1731
IV-1B	G11	300	40	80	50.9	30.0	50	0	4.5	175	344	240	0	681	345	2.40	0.05	2057	1800	
IV-2B				90	56.9	33.5					186	327	228	0		681		2.10	2031	1782
IV-3B				100	63.5	37.5					197	310	216	0		681		1.50	2006	1764
IV-1C	G13	300	40	80	50.9	30.0	50	0	4.5	175	344	240	0	681	381	2.60	0.05	2057	1829	
IV-2C				90	56.9	33.5					186	327	228	0		681		1.80	2031	1811
IV-3C				100	63.5	37.5					197	310	216	0		681		1.60	2006	1793
IV-1D	G18	300	40	80	50.9	30.0	50	0	4.5	175	344	240	0	681	543	2.10	0.05	2057	1985	
IV-2D				90	56.9	33.5					186	327	228	0		681		1.75	2031	1967
IV-3D				100	63.5	37.5					197	310	216	0		681		1.60	2006	1949

いは空気量を調整することによってモルタルの単位容積質量を変化させ、モルタルの単位容積質量と軽量粗骨材の絶乾密度の差（以下、密度差と示す）が材料分離抵抗性に及ぼす影響を検討した。使用した粗骨材はG13（絶乾密度1.27kg/ℓ）であり、単位粗骨材量（以下、Gvolと記す）は400ℓ/m<sup>3</sup>、細骨材容積比<sup>8)</sup>（以下、Vs/Vmと記す）は40%、水粉体容積比（以下、Vw/Vpと記す）は90%とした。配合I-1～4については、フライアッシュ置換率を対セメント容積比で0～75%としてペーストの密度を変化させた。また、配合I-5は、AE剤の添加率を調整して目標空気量を10%とすることで、モルタルの単位容積質量を変化させた。

**b) 単位粗骨材量**

単位粗骨材量が流動性、材料分離抵抗性、自己充てん性などのフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を検討するために、Gvolを270～400ℓ/m<sup>3</sup>に変化させて試験を行った。使用した粗骨材はG09（絶乾密度0.94kg/ℓ）であり、Vs/Vmを40%、Vw/Vpを90%、フライアッシュ置換率を対セメント容積比50%とした。

**c) 水粉体容積比**

ペーストの粘性の相違がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を検討するために、Vw/Vpを70～100%の範囲で4水準変化させて試験を行った。使用した粗骨材はG09（絶乾密度0.94kg/ℓ）であり、Gvol

は300ℓ/m<sup>3</sup>、Vs/Vmは40%、フライアッシュ置換率は対セメント容積比で50%とした。また、シリカフェームの混入がフレッシュ性状に及ぼす影響を検討するために、粉体容積の10%に相当するシリカフェームを混入した配合についても、Vw/Vpを65～90%の範囲で4水準変化させて試験を実施した。

**d) 軽量粗骨材の種類**

密度の異なる5種類の軽量粗骨材（G09、G10、G11、G13、G18）を用いて、Vw/Vpを80、90、100%に変化させて、骨材の種類がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響を検討した。Gvolは300ℓ/m<sup>3</sup>、Vs/Vmは40%、フライアッシュ置換率は対セメント容積比で50%とした。

**e) 流動距離および打込み速度の影響**

a)～d)において試験に供した配合のうち、代表的な2種類の配合を用いて、3m流動性評価試験を実施した。まず、打込み速度を900mm流動性評価試験と同じ1ℓ/5秒として流動距離の影響を検討した。次に、打込み速度を4ℓ/5秒とした場合について試験を実施して打込み速度の影響を検討した。試験に供したコンクリートの配合は、III-4（粗骨材：G09、Gvol：300ℓ/m<sup>3</sup>、Vw/Vp：100%）およびIV-1C（粗骨材：G13、Gvol：300ℓ/m<sup>3</sup>、Vw/Vp：80%）である。

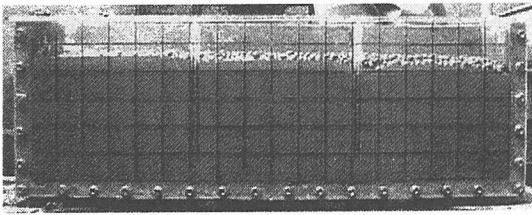


写真-1 900mm 流動性評価試験の結果  
(配合II-3 : Gvol=300 ℓ/m³)

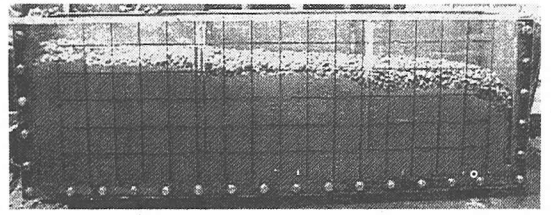


写真-2 900mm 流動性評価試験の結果  
(配合II-1 : Gvol=400 ℓ/m³)

### 3. 実験結果および考察

#### (1) モルタルと粗骨材の密度差の影響

##### a) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図-5に示す。配合I-1~4は、スランプフローが620~665mmの範囲であり、ほぼ一定の値であった。また、同一スランプフローが得られる高性能AE減水剤の添加率は、フライアッシュの置換率が高くなるにしたがって少なくなる傾向にあった。配合I-4と高性能AE減水剤の添加率を等しくして目標空気量を10%とした配合I-5は、スランプフローが515mmであった。500mmフロー到達時間、 $V_{75}$ 漏斗流下時間については、フライアッシュの置換率が高くなるにしたがって小さくなった。これは、スランプフローをほぼ等しくした場合には、フライアッシュ置換率の増加にともなってペーストの粘性が小さくなることによるものと考えられた。

図-6に鉛直方向材料分離評価試験の結果を示す。今回の試験条件では、フライアッシュの置換率を高めること、空気量を増加させることにより、モルタルと粗骨材の密度差が小さくなる。図に示すように、密度差を小さくすることで鉛直分離指数が1.00に近づき、粗骨材の浮上りの抑制が可能であることが確認された。また、前述の通り、フライアッシュの置換率を高めることでペーストの粘性が低下する傾向にあったが、ペーストの粘性が低下しても密度差を小さくすることで材料分離を抑制することが可能であるものと判断された。

##### b) 硬化コンクリート

図-7に材齢28日の圧縮強度試験の結果を示す。フライアッシュを混入しない配合I-1は57.6N/mm<sup>2</sup>の高強度が得られた。また、フライアッシュ置換率の増大にともなって圧縮強度が低下する傾向にあったが、置換率50%でも35N/mm<sup>2</sup>以上の強度が得られた。

#### (2) 単位粗骨材量の影響

##### a) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図-8に示

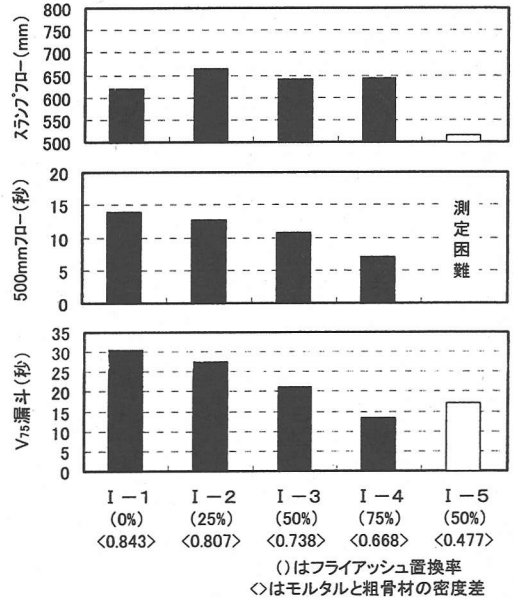


図-5 フレッシュコンクリートの試験結果

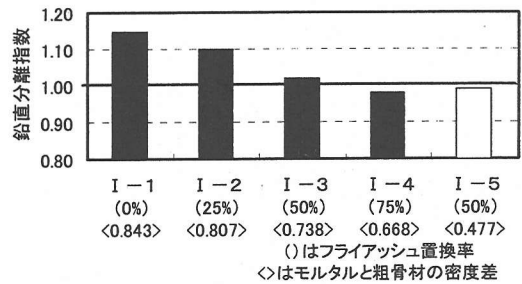


図-6 鉛直方向材料分離評価試験の結果

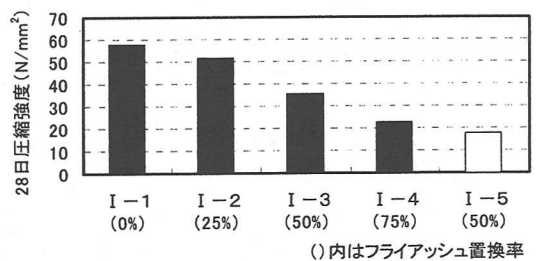


図-7 圧縮強度試験の結果

す。スランブフローは640~713mmの範囲であり、ほぼ同等であった。500mmフロー到達時間、 $V_{75}$ 漏斗流下時間についてはGvolの増加にともなって増大する傾向にあり、普通骨材を用いた場合と同様<sup>11)</sup>、コンクリートの変形性が損なわれるものと考えられた。

図-9に900mm流動性評価試験におけるGvolと流動勾配、モルタル未充てん率、水平分離指数の関係を示す。図に示すように、Gvolが350  $\ell/m^3$ を超えると流動勾配が極端に大きくなり、モルタル未充てん率についてもGvolが300  $\ell/m^3$ を超えると増加する傾向にあった。写真-1にGvol=300  $\ell/m^3$ の流動性評価試験の結果を、写真-2にGvol=400  $\ell/m^3$ の流動性評価試験の結果を示す。普通骨材を用いた通常の高流動コンクリートでは、本試験装置のように障害物が存在しない型枠内では、粗骨材同士が接触してもモルタルあるいはペーストが骨材の上方を覆うように流動して未充てん部が生じない。これに対して、軽量骨材を使用した高流動コンクリートでは、写真-2に示すように流動先端部で粗骨材同士あるいは粗骨材と型枠が接触して流動勾配が大きくなることが確認された。

なお、水平分離指数については、Gvol=270~400  $\ell/m^3$ の範囲では、流動方向の粗骨材の分布はほぼ同じであったが、モルタル未充てん率や写真-1, 2に示されるようにGvolが大きくなるにしたがって、流動先端部で粗骨材同士あるいは粗骨材と型枠の接触が顕著となり、粗骨材が分離する現象が確認された。つまり、本試験におけるモルタル未充てん率は、流動先端部における上下方向の分離を表しているものと考えられた。

コンクリートの軽量化を図る上では、密度の小さい軽量骨材を多く用いることがより有効であるが、軽量骨材を用いた高流動コンクリートでは、流動によって分離することなく密実に充てんするためにはGvolを300  $\ell/m^3$ 程度とするのが適当であると判断された。

### b) 硬化コンクリート

図-10に材齢28日の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。圧縮強度は、Gvolによらず、ほぼ一定であり、45N/mm<sup>2</sup>程度の強度を示した。これは、軽量粗骨材G09が本配合のモルタル強度に対して十分な強度を有していることを示しているものと考えられた。また、ヤング係数についても、Gvolとの相関は明瞭ではなく、1.8~2.0 $\times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>の範囲であった。

## (3) 水粉体容積比の影響

### a) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図-11に示す。スランブフローは645~775mmの範囲であった。500mmフロー到達時間および $V_{75}$ 漏斗流下時間については、シリカフュームを混入した場合の方が無混入の

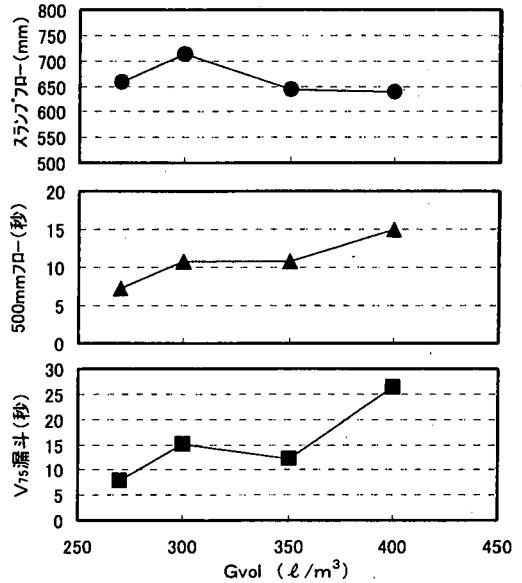


図-8 フレッシュコンクリートの試験結果

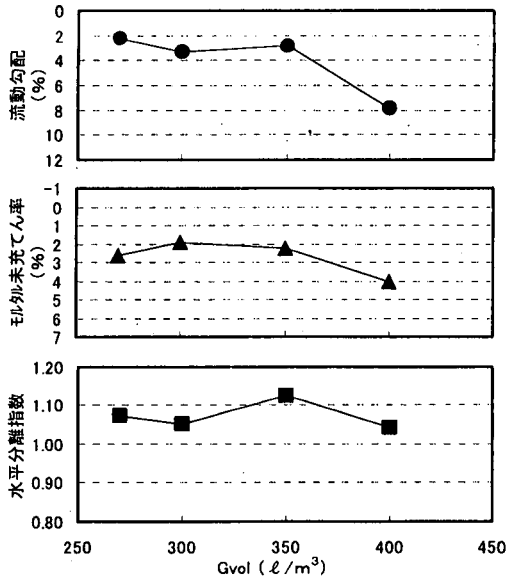


図-9 900mm流動性評価試験の結果

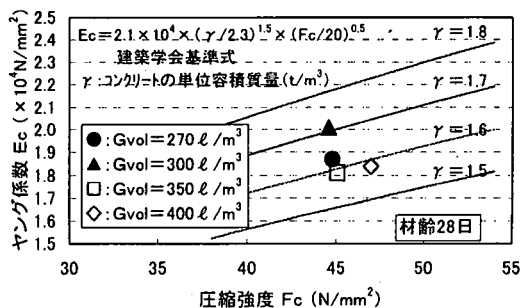


図-10 圧縮強度とヤング係数の関係

場合に比べて小さい値となる傾向にあった。これは、シリカフュームのいわゆるベアリング作用<sup>12)</sup>により、同一  $V_w/V_p$  でも変形性が高くなったためであると考えられた。また、 $V_w/V_p$  の低下にともなって 500mm フロー到達時間や  $V_{75}$  漏斗流下時間が大きくなる傾向にあり、ペーストの粘性が増大したことによるものと考えられた。

図-12 に 900mm 流動性評価試験における  $V_w/V_p$  と流動勾配、モルタル未充てん率、水平分離指数の関係を示す。シリカフュームを混入しない場合には、 $V_w/V_p = 100\%$  で流動勾配が 7.8% と大きくなったほかは 0.3~1.1% の範囲であり、比較的良好な流動勾配が得られた。モルタル未充てん率は  $V_w/V_p = 80\%$  以下で 0% であったのに対し、それ以上では  $V_w/V_p$  の増加にともなって大きくなった。シリカフュームを混入した場合には無混入の場合に比べて、同一  $V_w/V_p$  でも流動勾配やモルタル未充てん率が大きくなった。また、モルタル未充てん率が 0% となるのは  $V_w/V_p = 65\%$  であった。これは、前述のように、シリカフュームを混入した場合には、同一  $V_w/V_p$ 、同一スランプフローであっても、材料分離抵抗性が小さくなるためであり、より高い材料分離抵抗性、自己充てん性を得るためには、 $V_w/V_p$  を無混入の場合よりも小さくする必要があるものと考えられた。水平分離指数は、いずれの配合においても、1.00~1.10 の範囲であり、水平方向への粗骨材の分離はほとんど認められなかった。しかしながら、 $V_w/V_p$  が大きくなると上下方向の分離が顕著になる傾向にあり、 $V_w/V_p$  によっては水平方向の分離がなくとも流動先端部の上下方向の分離が生じる場合があることが明らかとなった。

これらのことから、 $V_w/V_p$  を小さくすることでペーストに適度な粘性を付与し、粗骨材の分離を抑制することで自己充てん性が得られるものと考えられた。 $V_w/V_p$  は、普通骨材を用いた場合と同様<sup>8)</sup>、軽量骨材を用いた高流動コンクリートにおいても材料分離抵抗性および自己充てん性の重要な要因であることが確認された。

### b) 硬化コンクリート

図-13 に材齢 28 日の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。今回の配合条件では、 $V_w/V_p$  を小さくすると水結合材比が小さくなるため、 $V_w/V_p$  の低下にともなって圧縮強度が増加する傾向を示した。また、シリカフュームを混入した場合には、同一  $V_w/V_p$  で圧縮強度が 2 割程度増大する傾向を示し、 $V_w/V_p = 65\%$  では、 $60\text{N/mm}^2$  を超える高強度が得られた。なお、圧縮強度とヤング係数の関係は、 $40\sim 60\text{N/mm}^2$  の範囲では図に示すようにほぼ線形の関係にあった。

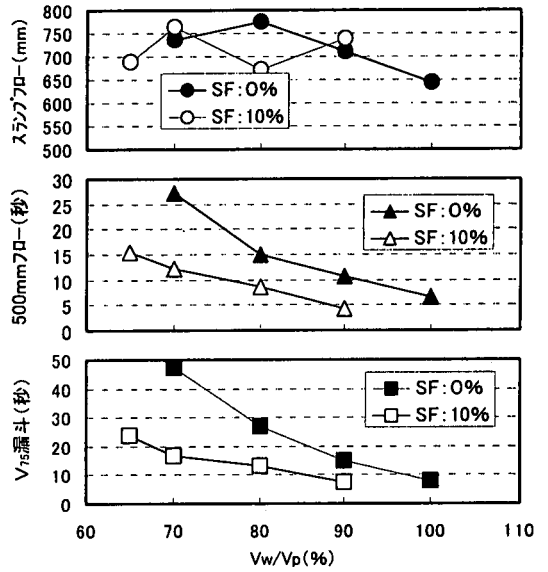


図-11 フレッシュコンクリートの試験結果

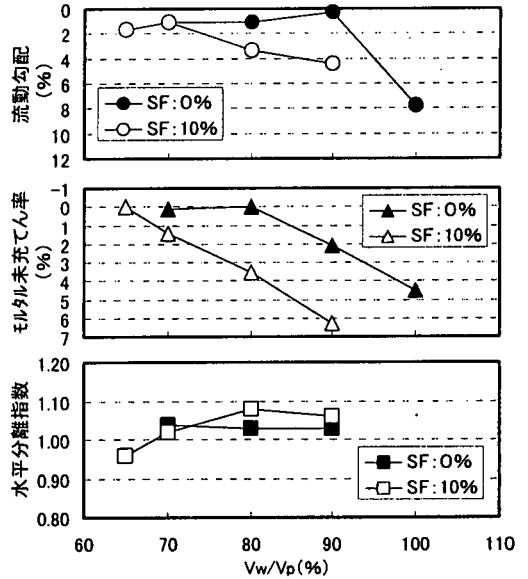


図-12 900mm 流動性評価試験の結果

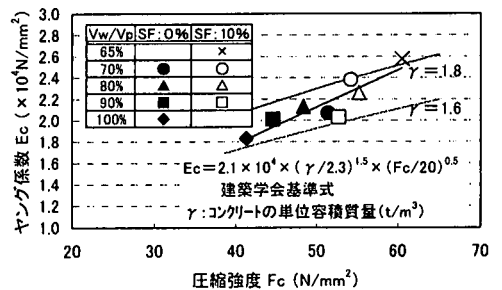


図-13 圧縮強度とヤング係数の関係

#### (4) 軽量骨材の種類の影響

##### a) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図-14に示す。スランプフローは645~775mmの範囲であった。500mmフロー到達時間および $V_{75}$ 漏斗流下時間は、いずれの軽量粗骨材を用いた場合でも $V_w/V_p$ が大きくなるほど小さくなる傾向にあった。また、今回の試験では、粗骨材の種類や絶乾密度が500mmフロー到達時間や $V_{75}$ 漏斗流下時間に及ぼす影響は、明瞭には認められなかった。

図-15に900mm流動性試験における骨材絶乾密度と流動勾配、モルタル未充てん率、水平分離指数の関係を示す。 $V_w/V_p=80\%$ では、いずれの軽量粗骨材を使用した場合でも、流動勾配が1.5%以下、モルタル未充てん率が0.5%以下であり、優れた材料分離抵抗性、自己充てん性を示した。 $V_w/V_p=90\%$ では、いずれの場合も流動勾配が2%程度であったが、 $V_w/V_p=80\%$ に比べて、流動勾配が大きくなる傾向にあった。また、粗骨材絶乾密度が $1.15\text{kg}/\ell$ より小さくなるとモルタル未充てん率が極端に大きくなり、所要の充てん性状を得ることができなかった。 $V_w/V_p=100\%$ では、流動勾配、モルタル未充てん率とも全体的に大きくなり、骨材密度が小さくなるにつれてほぼ直線的に増大した。これは、 $V_w/V_p$ を大きくするとペーストの粘性が低下して材料分離抵抗性が小さくなり、また、粗骨材の密度が小さいほどモルタルとの密度差が大きくなって材料分離抵抗性が小さくなるためであると考えられた。水平分離指数については、いずれの配合も1.0~1.1の範囲であったが、モルタル未充てん率の大きいものほど流動先端部における鉛直方向の分離が顕著になる傾向にあった。

これらのことから、軽量粗骨材の種類(密度)によって、所要の充てん性が得られる $V_w/V_p$ が異なり、骨材の密度が小さくなればなるほど、 $V_w/V_p$ を小さくする必要があると考えられた。

##### b) 硬化コンクリート

図-16に材齢28日の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図に示すように、粗骨材の絶乾密度が大きいものほど、また、 $V_w/V_p$ が小さくなるほど圧縮強度、ヤング係数とも大きくなる傾向にあった。また、圧縮強度とヤング係数はほぼ線形の関係を示したが、骨材原料の相違(流紋岩と石炭灰)によって、その関係式は異なり、同一強度で比較すると石炭灰焼成骨材(G18)は、流紋岩系骨材よりも4割程度大きいヤング係数が得られた。これは、石炭灰焼成骨材を用いた場合には、コンクリートの単位容積質量が大きくなることによるものと考えられた。

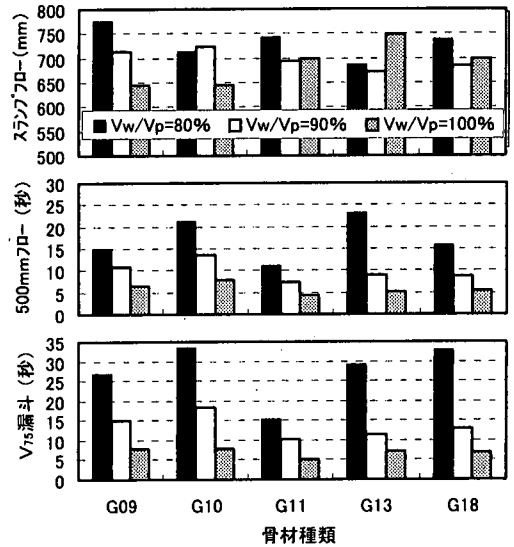


図-14 フレッシュコンクリートの試験結果

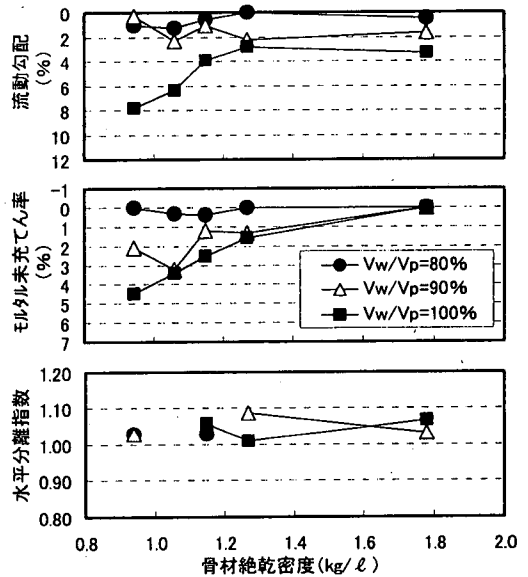


図-15 900mm流動性評価試験の結果

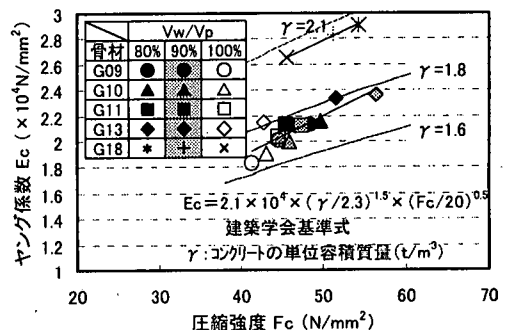


図-16 圧縮強度とヤング係数の関係

### (5) 流動距離および打込み速度の影響

(4)において、自己充てん性、材料分離抵抗性が不十分であった配合Ⅲ-4(粗骨材: G09, Vw/Vp: 100%)および良好な充てん性を示した配合Ⅳ-1C(粗骨材: G13, Vw/Vp: 80%)を用いて3m流動性評価試験を行った。図-17にフレッシュコンクリートの試験結果を、図-18に流動性評価試験における流動勾配, モルタル未充てん率の測定結果を示す。各試験ごとに練混ぜを行った結果を示したものであるが、各配合ごとのスランブフロー,  $V_{75}$  漏斗流下時間, 500mm フロー到達時間の試験結果のばらつきは小さく、ほぼ一定の値を示した。

#### a) 流動距離の影響

G09を用いた配合では、図-18に示すように、流動距離を3mとした場合には、流動勾配が小さくなり、モルタル未充てん率が大きくなった。流動勾配が小さくなった理由としては、天端全面に粗骨材の浮上りがみられたが、流動距離2m付近までは勾配が生じていなかったこと、流動先端部のみに粗骨材同士あるいは粗骨材と型枠の接触が顕著となって勾配が生じていたことが考えられる。また、モルタル未充てん率は6.2%であり、流動先端ではモルタルの回り込みはほとんどみられなかった。G13を用いた場合には、流動勾配, モルタル未充てん率とも大きくなる傾向にあった。流動勾配が大きくなった原因としては、500mm フロー到達時間や $V_{75}$  漏斗流下時間に示されるように、ペーストの粘性が高く、型枠との摩擦抵抗が卓越したため、打込み位置から全体的に勾配が生じたことによるものと考えられた。モルタル未充てん率は2.1%であったが、モルタルと粗骨材が一体となって流動しており、流動先端部で骨材の浮上りが僅かに生じる程度であった。

いずれにしても、打込み速度1ℓ/5秒の条件では、流動距離が長くなると材料分離が生じやすくなる傾向が認められた。しかしながら、900mm 流動性評価試験においてモルタル未充てん率が0%を示すような配合であれば、流動距離が3mとなってもモルタル未充てん率を2%程度に抑制できることが確認された。

#### b) 打込み速度の影響

打込み速度を約4倍にして3m流動性評価試験を行った結果、図-18に示すようにいずれの配合とも流動勾配, モルタル未充てん率が小さくなる傾向を示したが、G09を用いた配合は、打込み速度の影響は僅かであり、流動勾配やモルタル未充てん率はさほど変化しなかった。これに対して、G13を用いた配合では、流動勾配が大幅に改善されるとともに、モルタル未充てん率も0.4%まで低下した。これは、打込み速度を速くすることでコンクリートの変形速度が型枠との摩

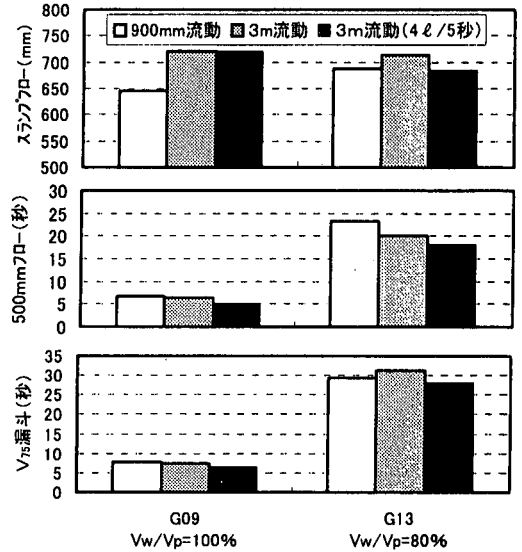


図-17 フレッシュコンクリートの試験結果

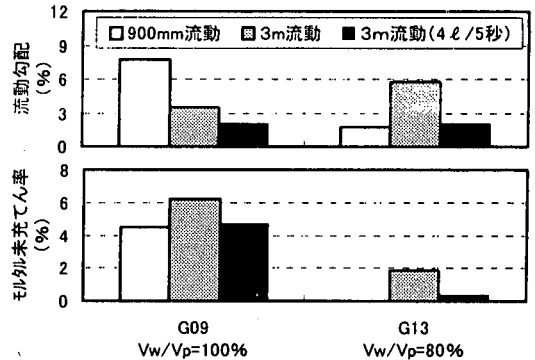


図-18 流動性評価試験の結果

擦抵抗を上回ったことによるものと考えられた。

また、本試験結果では試験に供した2配合とも900mm 流動性評価試験におけるモルタル未充てん率が打込み速度を4ℓ/5秒とした3m流動性評価試験におけるモルタル未充てん率とほぼ一致していること、実施工においてはさらに速い速度で打込みが行われることを考慮すると、軽量骨材を用いた高流動コンクリートの自己充てん性、材料分離抵抗性を900mm 流動性評価試験によってある程度まで評価できる可能性を示しているものと考えられた。

## 4. 高流動軽量コンクリートにおける自己充てん性の指標

3.の試験結果をもとにフレッシュコンクリートの試験結果が充てん性に及ぼす影響について考察した。

普通骨材を使用した高流動コンクリートでは、 $V_{75}$  漏斗流下試験では、スランブフロー600mm 以上の場合



には粗骨材同士の接触が卓越して、流下時間が大きくなる傾向にある<sup>13)</sup>。軽量粗骨材を使用した今回の試験においては、 $G_{vol}=400 \text{ l/m}^3$ とした場合でも、閉塞が生じなかった。これは、軽量粗骨材の最大寸法が15mm程度と小さく、粗骨材同士が接触しにくいこと、粗骨材同士が接触しても骨材粒形が球形に近いこと、閉塞が生じにくいことによるものと考えられた。また、今回の試験では、図-19に示すように500mmフロー到達時間と $V_{75}$ 漏斗流下時間に高い相関があり、500mmフロー到達時間が大きくなるにしたがって、 $V_{75}$ 漏斗流下時間も大きくなる傾向にあった。これらのことから、軽量骨材を使用した高流動コンクリートでは、 $V_{75}$ 漏斗流下時間は、骨材同士の接触よりもモルタルと漏斗の摩擦抵抗に支配され、モルタルの粘性を評価する指標となり得るものと判断された。

次に、 $V_{75}$ 漏斗流下時間と900mm流動性評価試験における流動勾配、モルタル未充てん率の関係を図-20に示す。 $G_{vol}=300 \text{ l/m}^3$ の条件では、いずれの骨材を使用した場合でも、 $V_{75}$ 漏斗流下時間が大きくなればなるほど、流動勾配およびモルタル未充てん率が小さくなり、自己充てん性および材料分離抵抗性が向上する結果となった。また、骨材密度が大きいものほど $V_{75}$ 漏斗流下時間が小さい領域で、流動勾配およびモルタル未充てん率が小さくなる傾向にあった。これらのことから、コンクリートの材料分離抵抗性、自己充てん性は、モルタルの粘性に支配されているものと推察された。

図-21に密度差- $V_{75}$ 漏斗流下時間-モルタル未充てん率の関係を示す。また、図-22に密度差-500mmフロー到達時間-モルタル未充てん率の関係を示す。図-21に示すように、モルタル未充てん率0%が得られたものは、図中に示した線よりも大きな $V_{75}$ 漏斗流下時間を示した配合であった。また、モルタルと軽量粗骨材の密度差が大きくなればなるほど、 $V_{75}$ 漏斗流下時間を大きくしなければ、未充てん部が生じてしまう傾向にあった。500mmフロー到達時間についても、図-22に示すように同様のことが伺えた。

これらのことから、今回使用した材料では、モルタルと軽量骨材の密度差を考慮して、 $V_{75}$ 漏斗流下時間および500mmフロー到達時間が図中にプロットしたモルタル未充てん率0%ラインよりも大きくなるように $V_w/V_p$ を設定することで、高い自己充てん性と材料分離抵抗性を有する軽量コンクリートの配合を選定することが可能であると考えられた。

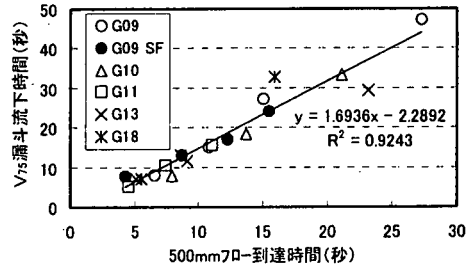


図-19 500mmフロー到達時間と $V_{75}$ 漏斗流下時間の関係

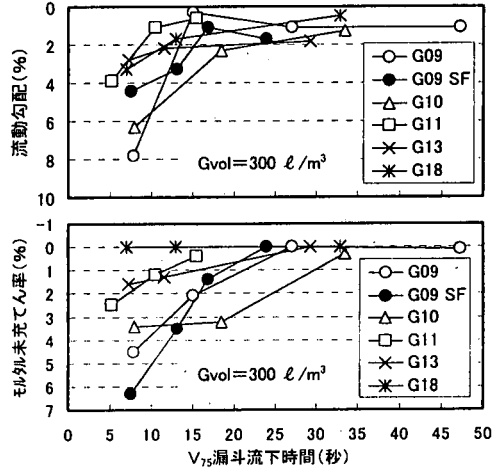


図-20  $V_{75}$ 漏斗流下時間と流動勾配・モルタル未充てん率の関係

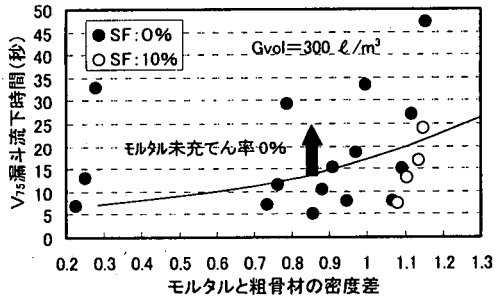


図-21 密度差- $V_{75}$ 漏斗流下時間-モルタル未充てん率の関係

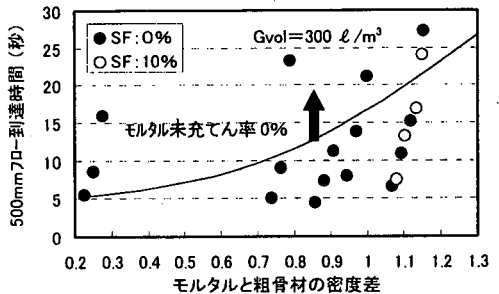


図-22 密度差-500mmフロー到達時間-モルタル未充てん率の関係

## 5. まとめ

軽量コンクリート I 種に自己充てん性を付与することを目的として、モルタルと粗骨材の密度差、水粉体容積比、軽量粗骨材の種類および単位量に着目して試験を行い、配合条件がフレッシュ性状に及ぼす影響を検討した。本研究で得られた知見をまとめると以下のようなになる。

- (1) ベーストの粘性が小さい場合でも、モルタルと軽量粗骨材の密度差を小さくすることで材料分離を抑制できる。逆に密度差が大きい場合でもベーストの粘性を適切に設定することで材料分離を抑制できる。
- (2) 軽量骨材を用いた高流動コンクリートは水平流動方向よりも流動先端部での鉛直方向の材料分離が顕著となる。
- (3) 単位粗骨材量は  $300 \text{ l/m}^3$  程度が適当である。
- (4) 900mm 流動性試験により、軽量骨材を用いた高流動コンクリートの自己充てん性、材料分離抵抗性を評価できる可能性がある。
- (5) 普通骨材を用いた場合と同様、 $V_{75}$  漏斗流下時間と 500mm フロー到達時間には高い相関があり、両者は配合設計を行う際の自己充てん性、材料分離抵抗性の指標となることを確認した。その際、水粉体容積比の選定が重要な要因となる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、長岡技術科学大学環境・建設系 丸山久一教授より多大な御指導・御助言を頂くとともに、実験にあたって同大学 野上良浩君より御助力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 人工軽量骨材コンクリート技術資料 No.12, 世界の軽量コンクリート技術の現状, 人工軽量骨材協会, 1997.3.
- 2) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1.

- 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) 坂田昇, 柳井修司, 石川雄康, 棚木隆: 高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.335-360, 1999.7.
- 5) 例えば橘大介, 木村薫, 内藤憲一: 高品質人工軽量骨材が軽量コンクリートの物性改善に及ぼす効果, 土木学会論文集, No.196/V-21, pp.89-98, 1994.8.
- 6) 河井徹, 岡田武二: 流動化した高強度軽量コンクリートの材料分離に関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.235-240, 1987.6.
- 7) 河井徹, 大野浩, 小沢一雅, 伊木崇: 締固め不要・高強度軽量コンクリートの開発と適用, セメント・コンクリート, No.552, pp.32-43, 1993.2.
- 8) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9.
- 9) 坂田昇, 丸山久一, 南昌義: 増粘剤ウエランガムがフレッシュコンクリートの自己充てん性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.57-68, 1996.5.
- 10) 坂田昇, 丸山久一, 稲葉美穂子, 皆口正一: 高流動コンクリートの材料分離の簡易評価方法について, 土木学会高流動コンクリートシンポジウム論文報告集, pp.157-162, 1996.3.
- 11) 万木正弘, 坂田昇, 坂井吾郎, 六本木信久: 高流動コンクリートの配合設計に関する研究, 鹿島技術研究所年報, Vol.42, pp.23-28, 1994.10.
- 12) 吉野公, 西林新蔵, 井上正一, 佐々木孝, 久米生泰: 高流動コンクリートの流動性に及ぼすシリカフューム添加の影響, 土木学会コンクリート技術シリーズ4, 「シリカフュームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告集, pp.15-20, 1993.11.
- 13) 小沢一雅, 坂田昇, 岡村甫: ロートをを用いた締固め不要コンクリートの充てん性評価, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.157-162, 1996.3.

(1999.3.12 受付)

## STUDY ON SELF COMPACTING HIGH PERFORMANCE LIGHTWEIGHT CONCRETE

Shuji YANAI, Noboru SAKATA, Yoshinobu NOBUTA and Takahisa OKAMOTO

The test results evaluating the properties of self compacting concrete using high performance artificial lightweight aggregates which has been developed recently are discussed in this paper. The main subjects are the influences of unit weight of mortar, specific gravity and unit quantity of lightweight coarse aggregate, and water to powder volume ratio. As the results, it is possible to design the mixture proportion of self compacting lightweight concrete with high resistance to segregation by setting up unit quantity of aggregate, unit weight of mortar, and water to powder volume ratio according to material properties properly.