

# 論文 高性能軽量コンクリートの自己充填性付与に関する実験的研究

柳井 修司<sup>\*1</sup>・坂田 昇<sup>\*2</sup>・渡邊 賢三<sup>\*3</sup>・信田 佳延<sup>\*4</sup>

**要旨:** 軽量粗骨材を使用した高流動コンクリートは、軽量粗骨材の比重が小さいことによる材料分離（特に骨材の浮上り）が生じやすくなることが知られている。本研究では、軽量骨材コンクリートⅠ種に自己充填性を付与することを目的として、モルタルの単位容積質量、単位粗骨材量、水粉体容積比を変化させて、流動性試験、充填性試験、材料分離抵抗性試験など各種試験を行った。その結果、モルタルの単位容積質量を小さくする、水粉体容積比を小さくするなどの適切な配合設計を行うことで高性能軽量コンクリートに高流動性、自己充填性、材料分離抵抗性を付与することが可能となったので報告する。

**キーワード:** 高性能軽量骨材、高流動コンクリート、自己充填性、材料分離

## 1. はじめに

我が国での土木分野における軽量骨材コンクリートの使用は1950年代から始まり、1960年代には設計基準強度40N/mm<sup>2</sup>の高強度軽量骨材コンクリートが適用されてきた<sup>1)</sup>が、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ェッティ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、低吸水率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>の实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鋼材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填性が要求されるようになっている。したが

って、軽量骨材コンクリートに高強度性や自己充填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。軽量骨材コンクリートの高強度化については、これまでに数多く研究がなされている<sup>5)</sup>が、高流動性や自己充填性付与に関する研究報告は少なく、配合設計時の指標や、流動性、充填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、軽量骨材コンクリートⅠ種に自己充填性を付与することを目的として、モルタルの単位容積質量と粗骨材の比重の差（以下、比重差と記す）、単位粗骨材量、水粉体容積比に着目して各種試験を行い、使用材料や配合条件が流動性、材料分離抵抗性、自己充填性に及ぼす影響をとりまとめたものである。

## 2. 実験概要

### 2. 1 使用材料

使用材料を表-1に示す。本研究では、粗骨材に絶乾比重の異なる2種類の人工軽量粗骨材

\*1 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 研究員 工修（正会員）

\*2 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 主任研究員 工博（正会員）

\*3 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 研究員（正会員）

\*4 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ長 工修（正会員）

表-1 使用材料

使用材料	記号	銘柄	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3,350cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	新潟産山砂	表乾比重2.60, 吸水率1.69%, 粗粒率2.30
人工軽量 粗骨材	G09	高性能軽量骨材	Gmax15mm, 絶乾比重0.94, 24h吸水率7.77%
	G13		Gmax15mm, 絶乾比重1.27, 24h吸水率2.07%
混和材	FA	フライアッシュ	密度2.20g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3,830cm <sup>2</sup> /g, 強熱減量2.2%
混和剤	SP	高性能AE減水剤	β-ナフタレンスルホン酸塩系
	VIS	特殊増粘剤	ウェランガム

表-2 試験項目および測定方法

試験項目	測定方法
スランプフロー	JSCE F503 1990
V <sub>f</sub> 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
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

を用いた。これらは流紋岩系の鉱物を造粒して焼成した高性能軽量粗骨材<sup>2)</sup>であり、従来の軽量粗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、高性能AE減水剤にはβ-ナフタレンスルホン酸塩系のものを使用した。

また、材料分離抵抗性の向上を

目的として増粘剤ウェランガム<sup>6)</sup>を使用した。

## 2.2 試験項目および測定方法

本研究で実施した試験項目および測定方法を表-2に示す。表中の鉛直方向材料分離評価試験とは、図-1に示すようにφ150×300mm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>7)</sup>。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900mm流動させ、その流動勾配や装置内への充填状況を評価しようとするものである。また、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。

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。練混ぜ時間は全

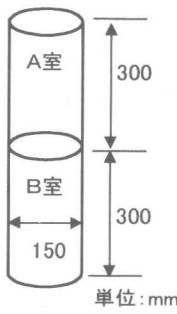


図-1 鉛直方向  
材料分離評価試験

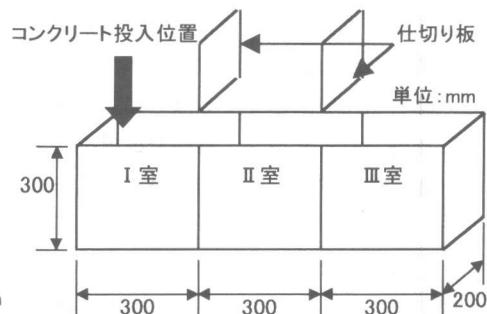


図-2 流動性評価試験装置

材料投入後120秒間とし、軽量粗骨材は24時間プレウェッティングしたものを使用した。なお、経過時間に伴うフレッシュコンクリートの性状変化が試験結果に及ぼす影響を少なくするためにすべての試験が練上りから20分以内に終了するようにした。

試験は3つのシリーズについて行った。シリーズIではセメントの一部をフライアッシュで置換する、ある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、モルタルと粗骨材の比重差が材料分離抵抗性に及ぼす影響を検討した。シリーズIIでは単位粗骨材量を変化させ、単位粗骨材量がコンクリートの自己充填性や材料分離抵抗性に及ぼす影響を検討した。また、シリーズIIIでは水粉体容積比を変化させ、ペーストの粘性の相違が材料分離抵抗性や自己充填性に及ぼす影響を検討した。

## 3. 比重差の影響（シリーズI）

3.1 コンクリートの配合および試験水準検討に先立って、モルタルと軽量粗骨材の比

表-3 コンクリートの配合および試験水準（シリーズⅠ）

No.	粗骨材	Gvol (ℓ)	Vs/Vm (%)	Vw/Vp (%)	W/C	FA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> )	
								W	C	FA	S	G				
I-1	G13	400	40	90	29.6	0	4.5	158	533	0	577	508	1.80	0.05	2113	1788
I-2					38.1	25		158	415	96	577		1.70		2077	1766
I-3					57.0	50		158	277	193	577		1.60		2008	1725
I-4					113.7	75		158	139	289	577		1.30		1938	1683
I-5					113.7	75		10.0	142	125	261	520	1.30		1747	1568

重差がコンクリートの材料分離抵抗性に及ぼす影響を検討した。試験に供したコンクリートの配合と試験水準を表-3に示す。使用した粗骨材はG13（絶乾比重1.27）である。いずれの配合も単位粗骨材量（以下、Gvolと記す）を400 ℓ/m<sup>3</sup>、細骨材容積比（以下、Vs/Vmと記す）を40%、水粉体容積比（以下、Vw/Vpと記す）を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%としてペーストの単位容積質量を変化させ、スランプフローが65±5cmとなるように高性能AE減水剤の添加率を調整した。また、配合I-5では目標空気量を10%として、モルタルの単位容積質量を変化させた（AE剤の添加率により調整）。

### 3.2 試験結果および考察

フレッシュコンクリートの試験結果を図-3に示す。配合I-1～4については、スランプフローは62.0～66.5cmの範囲で、ほぼ一定の値となった。同一のスランプフローを得られる高性能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。目標空気量を10%とした配合I-5については、配合I-4と高性能AE減水剤の添加率を等しくしたが、スランプフローは51.5cmとなつた。V<sub>75</sub>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つた。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つ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-4に鉛直方向材料分離評価試験におけるモルタルと粗骨材の比重差と鉛直分離指数の関

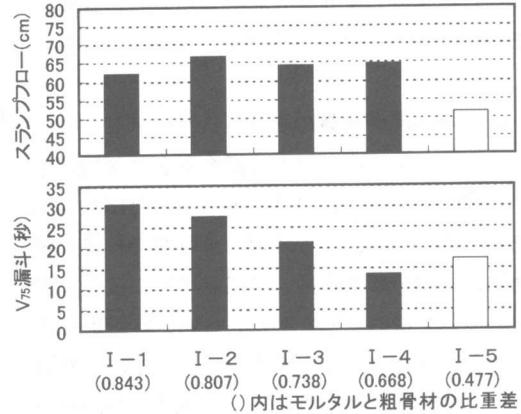


図-3 フレッシュコンクリートの試験結果

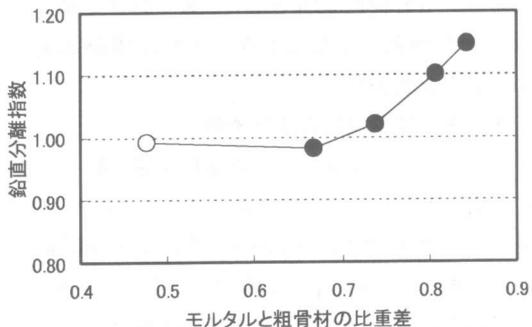


図-4 比重差と鉛直分離指數の関係

係を示す。ここに、鉛直分離指數とは図-1に示す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である（鉛直分離指數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）。同図より、モルタルと粗骨材の比重差が0.7を超えると鉛直分離指數は直線的に大きくなり、モルタルと粗骨材の比重差が大きくなると骨材の浮上りが顕著となつた。したがつて、材料分離抵抗性を付与するためには、結合材の一部をフライアッシュなどの比重の小さい粉体で置換すること、空気量を増加させるこ

表-4 コンクリートの配合および試験水準（シリーズII）

No.	粗骨材 (ℓ)	Gvol (%)	Vs/Vm (%)	Vw/Vp (%)	W/C (%)	FA置換率 (%)	Air (%)	単位量(kg/m³)					SP (P×%)	VIS (W×%)	単位容積質量(kg/m³)	
								W	C	FA	S	G			モルタル	コンクリート
II-1	G09	40	57.0	50	4.5	158	277	193	577	376	1.85	0.05	2008	1609		
II-2								172	302	210	629	329		2020	1667	
II-3								186	327	228	681	282		2031	1725	
II-4								195	342	238	712	254		2037	1760	

となどにより、モルタルと軽量粗骨材の比重差を小さくすることが重要であると考えられた。

#### 4. 単位粗骨材量の影響（シリーズII）

##### 4.1 コンクリートの配合および試験水準

試験に供したコンクリートの配合と試験水準を表-4に示す。ここでは、単位粗骨材量が流動性、材料分離抵抗性、自己充填性に及ぼす影響について検討するために、Gvolを270~400 ℓ/m³に変化させて試験を行った。使用した粗骨材はG09（絶乾比重0.94）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。スランプフローは65±5cm程度になるように高性能AE減水剤の添加率を調整した。

##### 4.2 試験結果および考察

フレッシュコンクリートの試験結果を図-5に示す。図に示すようにスランプフローは64.0~71.3cmの範囲であり、ほぼ同等の結果が得られた。また、V<sub>15</sub>漏斗下時間についてはGvolの増加とともに増大する傾向にあり、コンクリートの变形抵抗性が増大することによるものと考えられた。

図-6に流動性評価試験における流動勾配、モルタル未充填率、水平分離指数とGvolの関係を示す。流動勾配は図-7に示すようにコンクリート天端面の傾き((H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>)/L×100)として求めた。モルタル未充填率は図-7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Aa)に対する粗骨材の間にモルタルが回り込まなかつた部分(As)の面積比(As/Aa×100)として求めた。また、水平分離指数は図-2に示す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として求

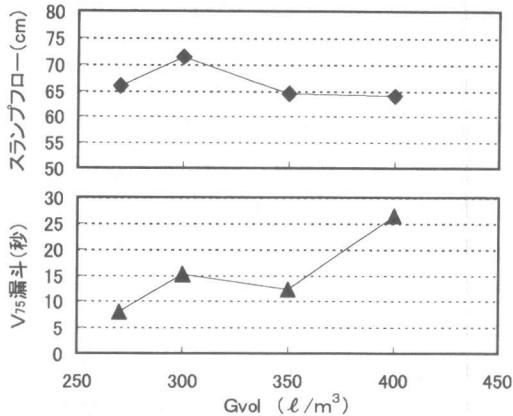


図-5 フレッシュコンクリートの試験結果

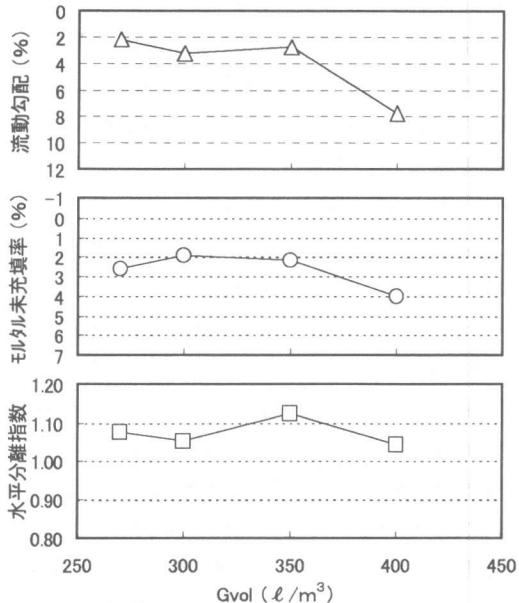


図-6 流動性評価試験の結果

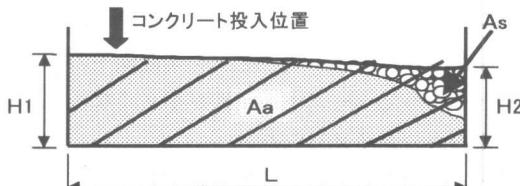


図-7 流動勾配・モルタル未充填率の考え方

表-5 コンクリートの配合および試験水準（シリーズIII）

No.	粗骨材	Gvol (ℓ)	Vs/Vm (%)	Vw/Vp (%)	W/C	FA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> )	
								W	C	FA	S			モルタル	コンクリート
III-1	G09	300	40	70	44.4	50	4.5	162	365	257	681	282	3.80	2093	1768
III-2				80	50.9			175	344	240	681		2.00	2057	1743
III-3				90	56.9			186	327	228	681		1.60	2031	1725
III-4				100	63.5			197	310	216	681		1.50	2006	1707

めた。図-6に示すように流動勾配およびモルタル未充填率はGvolが300 ℓ/m<sup>3</sup>を超えると徐々に増加し、400 ℓ/m<sup>3</sup>では極端に増大する傾向にあった。普通骨材を用いた高流動コンクリートでは、本試験装置のような障害物が存在しない型枠内では、粗骨材同士が干渉して材料分離が生じてもモルタルあるいはペーストが骨材を覆うように流動してモルタル未充填部が生じない。これに対して、軽量粗骨材を用いた今回の試験では、粗骨材量が多くなるにしたがつて特に流動先端部で粗骨材同士あるいは粗骨材と型枠が干渉して粗骨材が浮き上がり、これによって材料分離が顕著になる現象が観察された。つまり、モルタル未充填率は流動先端部の上下方向の材料分離を表しているものと考えられた。Gvol=270~350 ℓ/m<sup>3</sup>の範囲ではモルタル未充填率の値に大きな差はみられなかつたが、Gvol=350 ℓ/m<sup>3</sup>の場合には、骨材同士の干渉により、天端面のほとんどの部分において骨材の浮上りが観察された。

コンクリートの軽量化を図る上では、比重の小さい軽量骨材を多く用いることがより有効である。今回の試験では、流動によって分離することなく密実に充填するためのGvolは300 ℓ/m<sup>3</sup>が最大であり、Gvolを300 ℓ/m<sup>3</sup>とするのが適当であると判断された。なお、水平分離指数は、Gvolによらず1.03程度であり、水平流動方向の粗骨材の分布はほぼ均一であった。

## 5. 水粉体容積比の影響（シリーズIII）

### 5. 1 コンクリートの配合および試験水準

試験に供したコンクリートの配合と試験水準を表-5に示す。ここでは、Vw/Vpを70~100%の範囲で4水準に変化させて試験を行つた。使

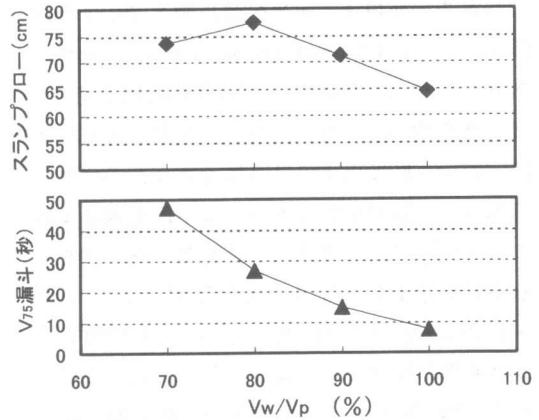


図-8 フレッシュコンクリートの試験結果

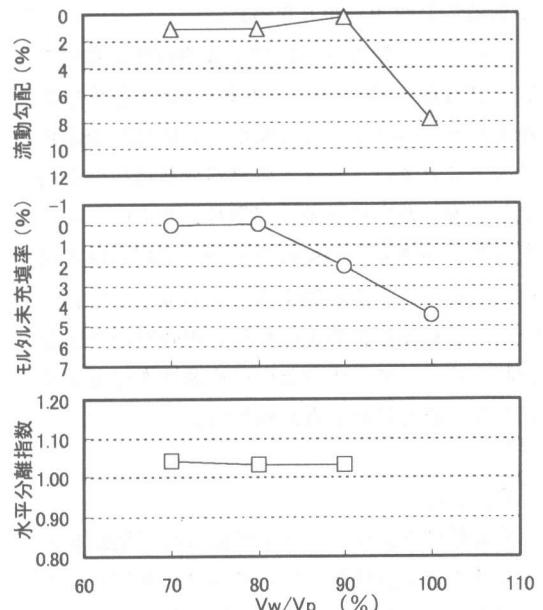


図-9 流動性評価試験の結果

用した粗骨材はG09（絶乾比重0.94）であり、Gvolは300 ℓ/m<sup>3</sup>、Vs/Vmは40%とした。

### 5. 2 試験結果および考察

フレッシュコンクリートの試験結果を図-8

に示す。スランプフローは 64.5~77.5cm の範囲であった。また、 $V_{15}$ 漏斗流下時間は  $V_w/V_p$  の低下にともなって大きくなる傾向にあった。これは、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-9に流動性評価試験における流動勾配、モルタル未充填率、水平分離指数と  $V_w/V_p$  の関係を示す。流動勾配は  $V_w/V_p = 100\%$  で 7.8% と大きくなったほかは 0.3~1.1% の範囲であり、優れた流動勾配が得られた。モルタル未充填率は  $V_w/V_p = 80\%$  以下では 0 % であったのに対し、それ以上では  $V_w/V_p$  が大きくなるほど大きくなり、 $V_w/V_p = 100\%$  では 4.5% となった。また、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明確には認められなかつた。これらのことから、 $V_w/V_p$  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。

モルタルと粗骨材の比重差は  $V_w/V_p = 70\%$  で 1.15,  $V_w/V_p = 80\%$  で 1.11 であり、比重差が 1.00 を上回っていた。しかしながら、 $V_w/V_p$  を小さくすることで、ペーストの材料分離抵抗性が向上し、優れた自己充填性が得られたものと判断された。つまり、比重の小さい軽量粗骨材を用いた場合でも  $V_w/V_p$  を小さくするなどして、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、十分な自己充填性を付与することが可能であると考えられた。

## 6. まとめ

軽量骨材コンクリート I 種に自己充填性を付与することを目的として、モルタルと粗骨材の比重差、単位粗骨材量、水粉体容積比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になる。

(1) 材料分離抵抗性を付与するためには、モルタルと軽量粗骨材の比重差を小さくする必要がある。その際、フライアッシュなどの

比重の小さい粉体を使用することが有効である。

- (2) 軽量骨材を用いた高流動コンクリートは材料分離が生じた場合、流動障害がない型枠内でも未充填部が生じる。
- (3) コンクリートの流動勾配を小さくし、分離することなく密実に充填するための単位粗骨材量は 300 ℥ / m<sup>3</sup> 程度が適当である。
- (4) 軽量粗骨材の絶乾比重が 0.94 程度でも、水粉体容積比を小さくして粘性を向上させることで自己充填性を付与することが可能である。

## 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, pp48~52, 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, 栃木隆 : 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, 1999.7, 投稿中
- 5) 例えは橋大介, 木村薰, 内藤憲一 : 高品質人工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) 坂田昇, 丸山久一, 南昌義 : 増粘剤ウェランガムがフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.57-68, 1996.5
- 7) 皆口正一, 丸山久一, 稲葉美穂子, 坂田昇 : 高流動コンクリートの材料分離測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.87~92, 1996.6