

# 論文 細骨材の混入がフレッシュモルタルのせん断ひずみ依存性に及ぼす影響

李 建哲<sup>\*1</sup>・谷川 恭雄<sup>\*2</sup>・森 博嗣<sup>\*3</sup>・三島 直生<sup>\*4</sup>

要旨：筆者らは既に、高濃度サスペンションの構成モデルとしてせん断ひずみ依存型粘塑性モデルを提案した。本研究では、セメントペーストおよびフレッシュモルタルを試料として小型せん断ボックス試験を行い、そのデータに基づいて、この構成モデルについて検討するとともに、レオロジー定数に及ぼす細骨材混入の影響を中心として各種調合要因の影響について検討を行った。その結果、セメントペーストおよびモルタルのレオロジー性質に、明らかなせん断ひずみ依存性が確認され、その傾向は、細骨材を混入することによって、より顕著となることが明らかとなった。

キーワード：フレッシュモルタル, せん断ひずみ依存型粘塑性モデル, レオロジー

## 1. まえがき

コンクリート工事を合理的に計画・管理するためには、まず、その材料の性質を把握する必要がある。既に、レオロジーを導入してフレッシュコンクリートの流動性状の定量化を試みた研究が数多く行われており、レオロジーモデルとしては、均質粘塑性体を仮定したビンガムモデルが最も多く用いられている。

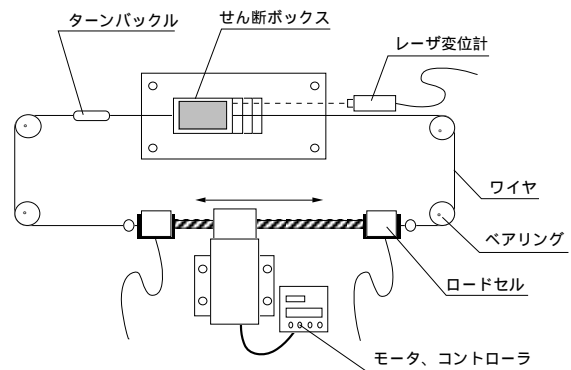
しかし、フレッシュコンクリートやモルタルのビンガム定数は測定者によって大きく異なり<sup>1)</sup>、いまだに正確な把握には至っていない。これは、あらゆる条件下においてレオロジー定数を不変とするビンガムモデルを仮定していること自体に問題がある可能性が大きい。

そこで、筆者らは既に、高濃度サスペンションの構成モデルとしてせん断ひずみ依存型粘塑性モデルを提案した<sup>2),3)</sup>。本研究では、セメントペーストおよびフレッシュモルタルを試料として小型せん断ボックス試験を行い、そのデータに基づいて、この構成モデルについて検討するとともに、レオロジー定数に及ぼす細骨材混入の影響を中心として各種調合要因の影響について検討した。

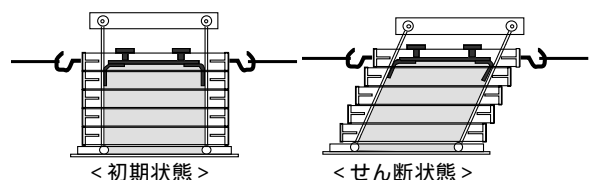
## 2. 実験の概要

### 2.1 測定方法

小型せん断ボックス試験器の概要を図-1に示す。せん断ボックス試験は、定ひずみ式単純せん断試験の1種であり、せん断ひずみ $\gamma$ の範囲が $\pm 0.5$ 以上と大きいこと、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ が $0.1$



(a) 平面図



(b) 側面図

図-1 小型せん断ボックス試験装置

\*1 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 工修(正会員)  
 \*2 名古屋大学教授 環境学研究科都市環境学専攻 工博(正会員)  
 \*3 名古屋大学助教授 環境学研究科都市環境学専攻 工博(正会員)  
 \*4 三重大学助手 工学部建築学科 工博(正会員)

～1.0/sと比較的広い範囲であることなどの特徴がある。測定時には各せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ ごとに3～4往復の繰返しせん断変形を与えた際の測定値を平均して用いた。

また、小型せん断ボックス試験と同時に、コンシステンシー試験として、JIS R 5201の規定に準ずるモルタルフロー試験および1/2サイズであるミニスランプ試験を行った。

## 2.2 試料

実験に用いたセメントペーストおよびモルタルの調合を表-1に示す。水セメント比W/Cを0.30～0.45の4水準に変化させたセメントペーストを、落下前のペーストフロー値 $Fl_0$ が $240 \pm 10$  mmとなるように、高性能AE減水剤の添加率HAE/Cを調整した。bシリーズでは増粘剤を添加し、同様に調整した。さらに、このセメントペーストに外割りで細骨材を加えたものを、フレッシュモルタルの調合とした。細骨材混入率S/Cは、各水セメント比ごとに3水準とした。

増粘剤には、コンクリート用のセルローズ系増粘剤を用い、高性能AE減水剤には、ポリカルボン酸系のものを使用した。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 小型せん断ボックス試験の結果

図-2は、小型せん断ボックス試験によって得られたせん断応力 $\tau$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係の一例で

表-1 試料の調合とコンシステンシー試験の結果

シリーズ	W/C	S/C	SCA/C (%)	HAE/C (%)	W (g/lit.)	C (g/lit.)	S (g/lit.)	Fl <sub>0</sub> (mm)	mSl. (mm)	mSf (mm)
P-1a	0.30	0.00	0.00	0.30	481	509	0	240	132	297
	0.35			0.17	519	471		247	136	309
	0.40			0.15	552	438		248	138	336
	0.45			0.08	581	410		247	140	331
M-1a-1.0	0.30	1.00	0.00	0.30	292	309	389	103	35	105
		1.20			271	286	433	102	17	100
		1.40			252	267	471	101	13	100
	0.35	1.20	0.00	0.17	302	274	414	115	93	151
		1.40			282	256	452	102	46	107
		1.60			265	240	485	105	24	101
	0.40	1.40	0.00	0.15	310	246	434	135	108	190
		1.60			292	232	467	110	95	142
		1.90			268	213	509	104	51	103
	0.45	1.60	0.00	0.08	317	223	450	147	112	204
		1.90			292	206	493	131	109	187
		2.10			277	196	517	111	64	119
P-1b	0.30	0.00	0.20	0.80	481	509	0	231	133	183
	0.35			0.50	519	471		243	135	302
	0.40			0.20	552	438		240	130	295
	0.45			0.10	581	410		250	140	363
M-1b-1.0	0.30	1.00	0.20	0.80	292	309	389	151	119	183
		1.20			271	286	433	157	115	174
		1.40			252	267	471	100	16	100
	0.35	1.20	0.20	0.50	302	274	414	131	115	166
		1.40			282	256	452	107	58	106
		1.60			265	240	485	108	78	120
	0.40	1.40	0.20	0.20	310	246	434	119	115	175
		1.60			292	232	467	104	52	112
		1.90			268	213	509	104	51	127
	0.45	1.60	0.25	0.10	317	223	450	110	100	147
		1.90			292	206	493	110	93	135
		2.10			277	196	517	104	64	109

[注] W/C: 水セメント比, S/C: 細骨材率, SCA/C: 増粘剤添加率, HAE/C: 高性能AE減水剤添加率, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, Fl<sub>0</sub>: 落下運動を与える前のフロー値, mSl.: ミニスランプ値, mSf: ミニスランプフロー値。

ある。ここではせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma} = 0.2/s$ の場合のみを示した。なお、試料M-1a-1.2, M-1a-1.4およびM-2a-1.4は、せん断応力が大きすぎたために、小型せん断ボックス試験装置では両者の関係を測定できなかった。同図から明らかなように、せん断応力 $\tau$ はせん断ひずみ $\gamma$ の増大とともに増加している。さらに、その勾配は、テーブル

落下前のモルタルフロー値 $Fl_0$ が小さな硬練りの試料ほど大きくなっている。

また、試料やせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ によっては、せん断ひずみが $\gamma$  0.1および0.9  $\gamma$ の範囲において、測定データが安定していない場合がある。これらの範囲では、試料の充填の程度によっては試料に強制変形が伝達されていない可能性が考えられるため、本報では、この範囲のデータを考察の対象から除外し、以下の考察では、せん断ひずみ $\gamma = 0.1$ をせん断ひずみ $\gamma$ の原点とした。

図-3は、測定結果から得られたせん断ひずみ $\dot{\gamma}$ に伴うコンシステンシー曲線の変化の一例である。同図からも、せん断ひずみ $\dot{\gamma}$ の増大とともにコンシステンシー曲線が右側にシフトする傾向が認められ、フレッシュモルタルのレオロジー性質に、せん断ひずみ依存性があることを明確に示している。

### 3.2 せん断ひずみ依存型の粘塑性モデル

図-4は、ビンガムモデルとせん断ひずみ依存型粘塑性モデルの概要を示したものである。フレッシュコンクリートやフレッシュモルタルのような高濃度サスペンションでは、内包する固体粒子のダイラタンシーにより、せん断ひずみ $\dot{\gamma}$ の増大に伴ってせん断応力 $\tau$ が増大する現象が観察される<sup>2),3)</sup>。また、このせん断応力 $\tau$ の増大傾向は、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ によって異なり、試料全体としては粘性体に似た挙動を示す。

筆者らは、これらの複雑な性質を単純化し、図-4(c)および式(1)に示すように、降伏値 $\tau_y$ と塑性粘度 $\eta$ がせん断ひずみ $\dot{\gamma}$ に対して線形に変化するモデルを仮定した<sup>3)</sup>。

$$\begin{aligned} \tau_y &= \tau_{y0} + \tau_{y1} \dot{\gamma} \\ \eta &= \eta_0 + \eta_1 \dot{\gamma} \end{aligned} \quad (1)$$

図-5は、小型せん断ボックス試験で得られた降伏値 $\tau_y$ とせん断ひずみ $\dot{\gamma}$ の関係である。同図より、すべての

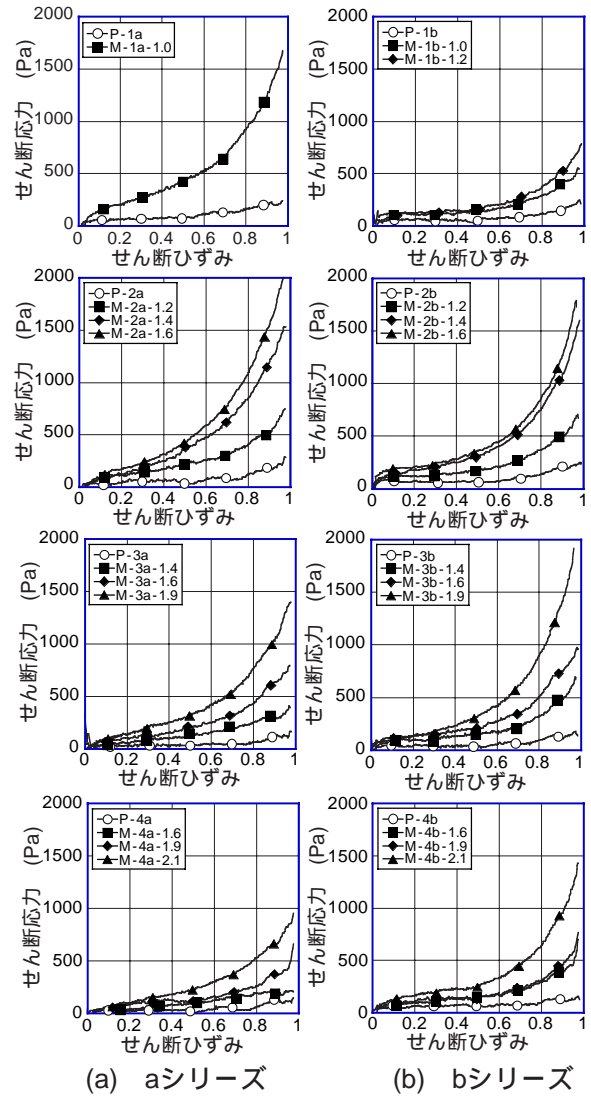


図-2 せん断応力 とせん断ひずみ の関係 (せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma} = 0.2/s$ )

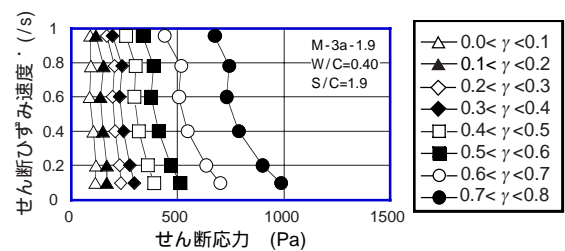


図-3 コンシステンシー曲線の一例

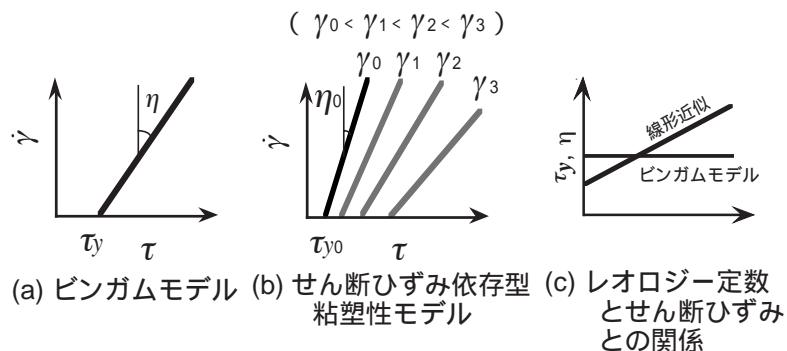


図-4 レオロジーモデルの概要

試料において、せん断ひずみ $\gamma$ の増加に従って降伏値 $\tau_y$ が増加する傾向が認められた。ただし、セメントペーストの降伏値 $\tau_y$ はせん断ひずみ $\gamma$ に対して比較的線形に増加しているのに対して、モルタルでは、明らかに曲線的な増加傾向を示している。この関係を直線で近似すると、図-6に示すように、せん断ひずみ $\gamma = 0$ の状態における降伏値である $\tau_{y0}$ が精度良く評価できない可能性がある。

そこで本報では、式(2)に示すように、降伏値 $\tau_y$ がせん断ひずみ $\gamma$ の $n$ 乗に比例して増加するモデルを仮定した。ただし、パラメータが煩雑になることを避けるために、指数 $n$ を1, 2, 3のいずれかに固定して検討を行った。

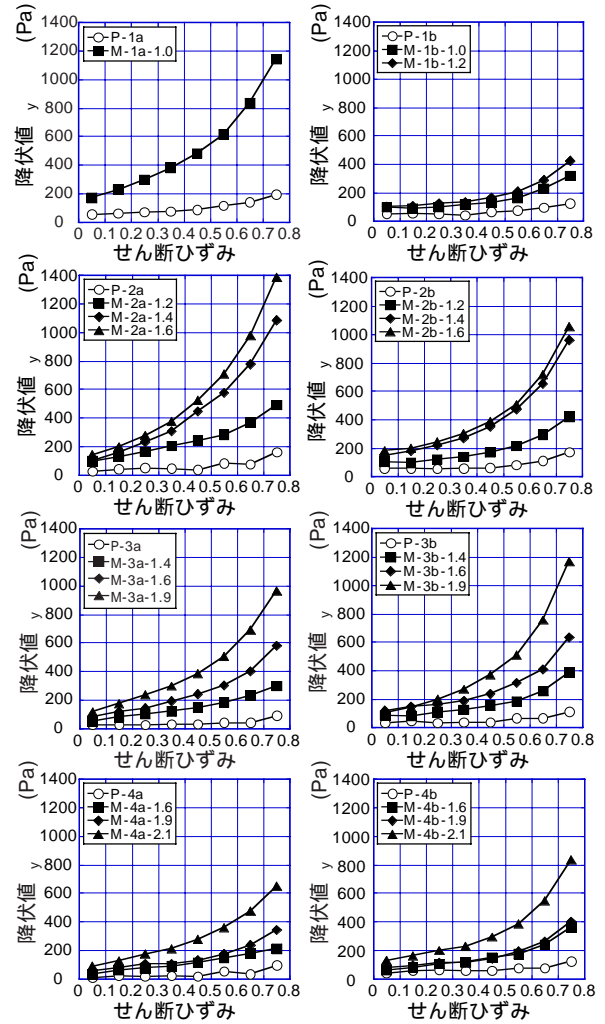
$$\tau_y = \tau_{y0} + \tau_{yn} \gamma^n \quad (2)$$

ここに、 $\tau_{y0}$ ：せん断ひずみ $\gamma = 0$ の状態における降伏値(Pa)，

$\tau_{yn}$ ：せん断ひずみ $\gamma$ の $n$ 乗に比例する降伏値のパラメータ(Pa)

図-7は、図-5の降伏値 $\tau_y$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係に対して、式(2)で $n=1, 2, 3$ を代入した3種類の関数で近似したときの相関係数 $R$ を比較したものである。 $n=1$ の線形関数よりも、 $n=2, 3$ の関数で近似した方がより高い相関を示す。特に、増粘剤を添加したbシリーズでは、すべての試料において $n=3$ の場合が最も高い相関を示した。増粘剤無添加のaシリーズの試料では、 $n=2$ の方が良い相関を示すものもあり、 $n$ の値も何らかの性状の違いを表現しているものと考えられるが、aシリーズのそれらの試料においても $n=3$ の場合には高い相関を示していることから、以下の考察では $n=3$ とした3乗モデルを用いることとし、パラメータ $\tau_{y0}$ 、 $\tau_{y3}$ により降伏値に関する考察を行う。

図-8に、小型せん断ボックス試験で得られた塑性粘度 $\eta$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係の例を示す。本実験の範囲における塑性粘度 $\eta$ は、増粘剤を添加したbシリーズのうち、水セメント比 $W/C$ の低い試料では検出されている場合もあるが、ほと



(a) aシリーズ (b) bシリーズ

図-5 降伏値 $\tau_y$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係

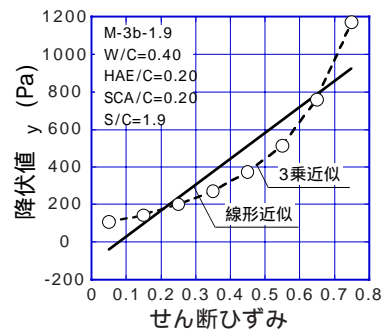
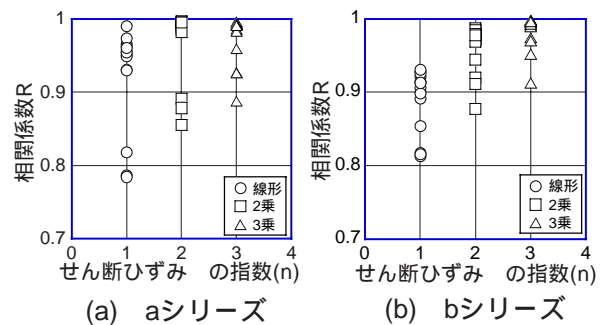


図-6 降伏値 $\tau_y$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係の線形近似の一例



(a) aシリーズ

(b) bシリーズ

図-7 各レオロジーモデルの相関係数の比較

んどの試料において負の値となっている。これは、繰返しせん断を与えることによる試料の液化化およびセメント粒子の凝集の影響が考えられ、現在のところ詳細なメカニズムは不明である。ただし、既往の研究<sup>4)</sup>によれば、サスペンションを試料とした場合には塑性粘度が測定されていることから、試験装置の問題とは考えにくく、本試験におけるせん断ひずみ速度およびせん断ひずみの範囲では、塑性粘度は限りなく0に近い可能性がある。また、今回の塑性粘度の測定値は小さいため、以下の考察は、降伏値のみを検討対象として行う。

### 3.3 3乗モデルによる降伏値

#### (a) セメントペースト

図-9は、図-5の関係から3乗モデルによって得られるセメントペーストのレオロジー定数と水セメント比W/Cの関係を示したものである。

せん断ひずみ $\gamma = 0$ における降伏値である $\tau_{y0}$ は、aシリーズの試料において、水セメント比W/Cの増加に伴って減少している。一方、増粘剤を添加したbシリーズでは、水セメント比W/Cに関係なくほぼ一定となった。これは、マトリックスである水の粘性が低く、セメント粒子が沈殿しやすいaシリーズに対して、増粘剤を添加したbシリーズでは、増粘剤の粘性によってセメント粒子が沈殿しにくくなり、ダイラタンシーの影響が小さくなったためと考えられる。また、せん断ひずみ $\gamma$ に対する降伏値のパラメータである $\tau_{y3}$ も、多少異なるものの、全般的には $\tau_{y0}$ と類似の傾向を示している。

#### (b) モルタル

図-10は、図-5の降伏値 $\tau_y$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係を3乗モデルで曲線近似して求めたモデルによるモルタルのレオロジー定数と細骨材混入率S/Cの関係を示したものである。

$\tau_{y0}$ および $\tau_{y3}$ ともに、増粘剤の添加の有無とは関係なく、水セメント比の増加に従って減少し、細骨材混入率S/Cの増加に従って増加している。これは、試料のサスペンション濃度が増加するに従って、せん断ひずみ依存性がより顕著

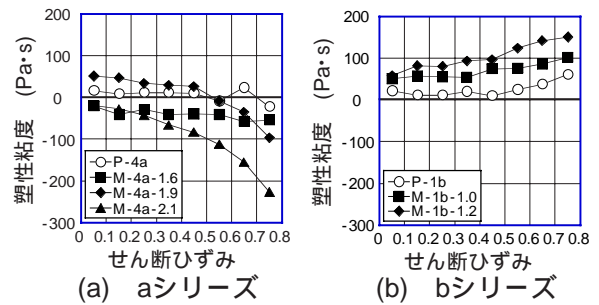


図-8 塑性粘度 $\eta$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係の例

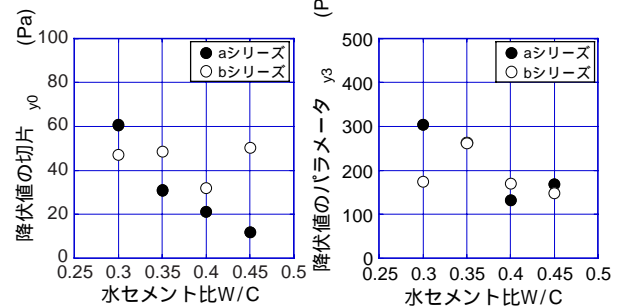


図-9 セメントペーストのレオロジー定数と水セメント比W/Cの関係

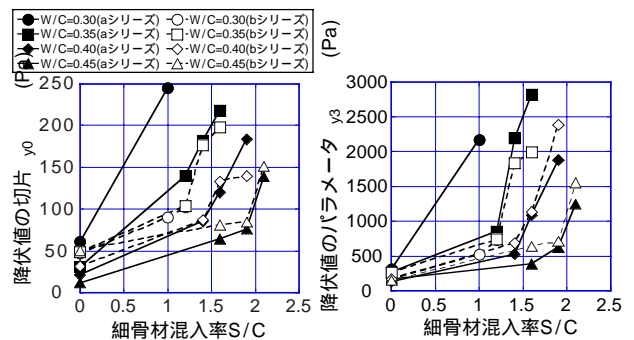


図-10 モルタルのレオロジー定数と細骨材混入率S/Cの関係

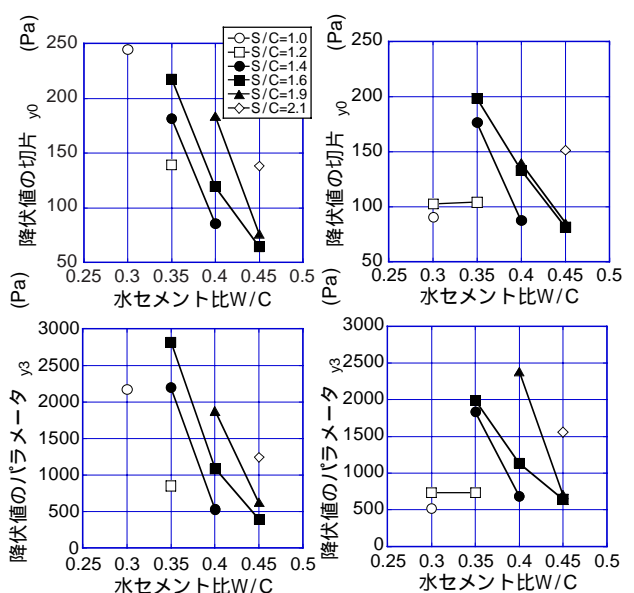


図-11 モルタルのレオロジー定数と水セメント比W/Cの関係

に現れることを示している。

図-11は、モルタルのレオロジー定数と水セメント比W/Cの関係を示したものである。

$\tau_{y0}$ 、 $\tau_{y3}$ はともに、aシリーズでは、水セメント比W/Cの増加に従って減少する傾向を示した。一方、増粘剤を添加したbシリーズでは、水セメント比W/C=0.30の試料で $\tau_{y0}$ 、 $\tau_{y3}$ が小さくなった。これは、高性能AE減水剤の量が多いことに起因するものと考えられる。

図-12は、モルタルのレオロジー定数とコンシステンシー試験の結果との関係を示したものである。 $\tau_{y0}$ および $\tau_{y3}$ は、いずれもモルタルフロー値 $Fl_0$ およびミニスランプフロー値 $mSf$ と負の相関が認められる。そこで、これらの関係を次式で近似し、その結果を図-12中に併示した。

$$y = \frac{k}{r^2 + c} \quad (3)$$

ここに、 $y$  :  $\tau_{y0}$ または $\tau_{y3}$ 、  
 $r$  :  $Fl_0$ または $mSf$

aシリーズでは、非常に高い相関係数Rが得られたが、bシリーズでは、低い値にとどまった。また、 $\tau_{y0}$ に比べて $\tau_{y3}$ の方がいずれも相関係数がやや高い。これは、 $\tau_{y0}$ に比べて $\tau_{y3}$ は、せん断ひずみの大きな領域に対する性質に対応しているため、流動停止時の測定値であるフロー値との相関が良くなったものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、セメントペーストおよびフレッシュモルタルを試料とした小型せん断ボックス試験を行い、そのレオロジー性質の定量化を試みた。その結果、セメントペーストおよびモルタルのレオロジー性質には、せん断ひずみ依存性があり、その性質は、細骨材の混入および混和剤の添加によって、より顕著となることが明らかとなった。また、試料によっては、降伏値がせん断ひずみに対して直線的ではなく、曲線的に増加するものがあり、そのモデルとして、降伏値がせん断ひずみの3乗に比例する構成モデ

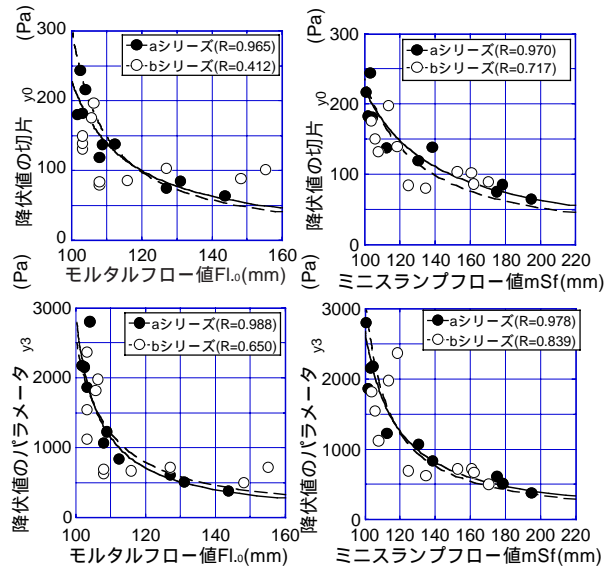


図-12 モルタルのレオロジー定数とコンシステンシー試験結果との関係

ルを提案した。

#### 謝辞

本研究に際して、黒川善幸助手（名古屋大学環境学研究科）・高田信之君（名古屋大学大学院）・服部満君（名古屋大学）の協力を得た。本研究費の一部は、平成13年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)・奨励研究(A)によった。付記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 谷川恭雄ほか：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.1-50，1996.4
- 2) 三島直生，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸，寺田謙一，服部俊範：せん断ボックス試験による高濃度サスペンションのレオロジー性質に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.528，pp.13-19，2000.2
- 3) 三島直生，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸：せん断ひずみ依存型モデルを用いたフレッシュモルタルの流動シミュレーションに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.541，pp.31-35，2001.3
- 4) 高田信之，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸，三島直生，李建哲：小型せん断ボックス試験によるサスペンションのレオロジー性質の測定，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，A-1，pp.169-170，2001.9
- 5) 李建哲，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸，三島直生，高田信之：小型せん断ボックス試験によるセメントペーストのレオロジー定数の定量化に関する基礎的実験，日本建築学会学術講演梗概集(東北)，A-1，pp.171-172，2001.9