

論文

[1077] フレッシュコンクリートの付着およびすべり性状に関する基礎的研究

渡辺健治<sup>\*1</sup>・寺西浩司<sup>\*2</sup>・森博嗣<sup>\*3</sup>・谷川恭雄<sup>\*4</sup>

1. まえがき

フレッシュコンクリートの変形抵抗性をレオロジーの観点から整理し、ビンガムモデルを構成則として適用した研究が数多く報告されているが、フレッシュコンクリートと型枠面などとの付着特性については不明な点が多く、その構成則は明らかにされてはいない[1,2]。

フレッシュコンクリートの付着特性には、付着力と粘着力の二つが考えられる。前者は試料と型枠面などとの接着特性を示す値であり、後者は、試料自体の特性を示す値である。また、付着特性は、ずり変形に関する特性(すべり特性)と、引張変形に関する特性の二つに分類することができ、すべり特性は、試料の境界面における摩擦特性として測定されることが多い。高流動コンクリート[3]のように、大きなスランプフロー値が得られるようなコンクリートの場合、通常のコンクリートに比べてすべり抵抗によるエネルギー損失が大きくなることから、ポンプ圧送を計画する場合などでは特にすべり特性の定量化が重要となる。一方、引張付着特性は、型枠や鉄筋との直接的な付着性を支配するばかりでなく、マトリックスモルタルと粗骨材の分離特性にも大きく影響を及ぼし、適度な付着能力は材料分離抵抗性に不可欠である。

本研究では、高流動コンクリートのフレッシュ時の付着特性に関する基礎資料を得るために、そのマトリックスモルタルを用いて、直接引張付着試験およびすべり抵抗試験を行った。

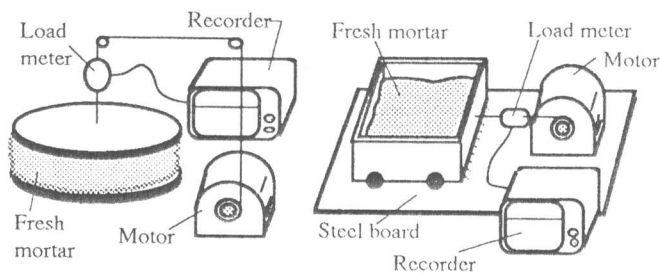
2. 実験の概要

2.1 直接引張付着試験

直接引張付着試験装置の概要を図-1(a)に示す[4]。試料となるフレッシュモルタルをアクリル製の容器に20mmの深さで平坦に充填し、直径100mmのアクリル製付着円板を上部より接触させる。この付着板を3.5mm/sの一定速度で引き上げ、その変位と抵抗荷重の関係を変位計とロードセルを用いて測定した。付着抵抗特性は、スライダーとダッシュポットを並列に接続したバイリニアモデルで表現できる可能性もあり、この場合は引上げ速度が問題となる。しかし、付着面におけるひずみの定義が難しく、測定も複雑となることから、今回の実験では一定速度の条件下における挙動について考察することにした。

2.2 すべり抵抗試験

すべり抵抗試験装置の概要を図-1(b)に示す[2]。鋼板の上に置かれた断面100mm×100mmの底のない容器に試料を深さ50mmで



(a) 直接引張付着試験装置 (b) すべり抵抗試験装置

図-1 試験装置の概要

表-1 実験-1 に用いた調合

Series	W/B	S/B	s/m	C/B	HAE
N-35	40	1.00	0.35	1.0	0
N-40		1.24	0.40		
N-45		1.53	0.45		
N-50		1.87	0.50		
P-10	30	1.24	0.46	0.8	1.5
S-10		1.17	0.41		3.0

[Notes] W/B: Water-binder ratio(%), W: Water (kg/m<sup>3</sup>), B: Binder(C+Si), C: Cement (kg/m<sup>3</sup>), Si: Silica fume(kg/m<sup>3</sup>), S/B: Sand-binder ratio, s/m: Volumetric ratio of sand to mortar, C/B: Cement-binder ratio, HAE: High-range water reducing AE agent (%/B).

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修(正会員)、\*2 前田建設工業 研究員、工修(正会員)、\*3 名古屋大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)、\*4 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)。

充填し、その上部に錘を載せることによって、すべり面に作用する垂直応力を変化させた。すべり挙動に関する構成則としては、式(1)に示すように、すべり抵抗応力が垂直応力およびすべり速度の双方に線形比例するレオロジーモデルが提案されている[1]。

$$\sigma_h = S_1 \sigma_n \beta + S_2 \beta + S_3 \sigma_n + S_4 = \eta_s \beta + \tau_s \quad \dots (1)$$

ここに、 $\sigma_h$ : すべり抵抗応力,  $\sigma_n$ : 垂直応力,  $\beta$ : すべり速度,  $S_1 \sim S_4$ : 材料定数,  $\eta_s$ : すべり粘性,  $\tau_s$ : すべり降伏値。

式(1)中のすべり粘性 ( $\eta_s$ ) およびすべり降伏値 ( $\tau_s$ ) は、いずれも垂直応力 ( $\sigma_n$ ) の関数であり、これらの値を定量化するために、本実験では、垂直応力を1120~2230Paの範囲で4段階に、また、すべり速度を10~50mm/sの範囲で4段階に変化させ、同一試料に対して合計16点の測定を行った。

### 2.3 試料

実験-1では、フレッシュコンクリートの付着特性に関する基礎的な情報を収集する目的で、表-1に示すような調合のモルタルを作成し、細骨材量、高性能A E減水剤（以下、HAEと略す）、混和材などが付着挙動に与える影響について考察した。Nシリーズでは、細骨材の体積濃度(s/m)を35~50%の範囲で変化させた。また、PおよびSシリーズでは、HAEの添加量が付着特性に与える影響を考察する目的で、P-10およびS-10それぞれの基準添加量1.5%/Bおよび3%/Bに対して40~100%の範囲で変化させた試料も準備した。

実験-2では、HAEの添加量の異なる高流動コンクリートをウェットスクリーニングし、そのマトリックスモルタルに対して付着試験およびすべり抵抗試験を行った。表-2にウェットスクリーニングモルタルの調合を示す。普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末（比表面積600m<sup>2</sup>/kg）の2成分からなる結合材を用い、分離低減剤として、セルロースエーテル系のものを使用した。なお、実験-2で用いた高流動コンクリートは、いずれもスランプフロー値が600~700mmの範囲にあった。

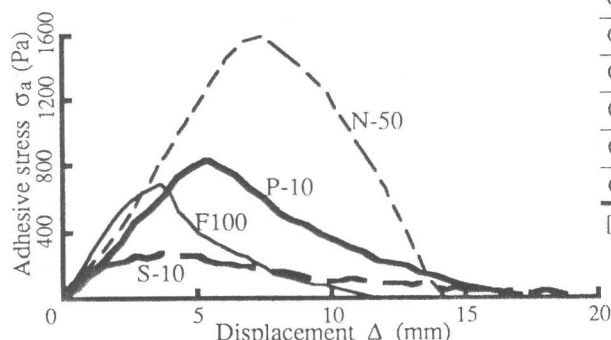


図-2 付着応力( $\sigma_a$ )—変位( $\Delta$ )関係の一例

表-2 実験-2に用いた調合

Series	W/B	S/B	s/m	C/B	SCA	HAE
F080	33	1.53	0.47	0.5	0.47	2.24
F100						2.80
F110						3.08
F120						3.36
F130						3.64

[Notes] W/B: Water-binder ratio(%), W: Water (kg/m<sup>3</sup>), B: Binder (C+Sg), C: Cement (kg/m<sup>3</sup>), Sg: Ground granulated blast furnace slag (kg/m<sup>3</sup>), S/B: Sand-binder ratio, s/m: Volumetric ratio of sand to mortar, C/B: Cement-binder ratio, SCA: Segregation control agent (kg/m<sup>3</sup>), HAE: High-range water reducing AE agent (%/B).

表-3 実験-3に用いたモルタルの調合

Series	Binder	W/B	S/B	s/m	C/B	SCA	HAE	
L35-30	C+Si	35	1.79	0.50	0.9	A	1.6-2.9	
C35-30	C		1.82	0.51	1.0		1.2-1.6	
G35-30	C+Sg		1.78	0.50	0.5		0.7-1.1	
G35-36			1.46	0.45	0.5		0.6-1.0	
C35A30	C		1.82	0.51	1.0		0.15	1.5-1.8
G35A30	C+Sg		1.78	0.50	0.5		0.30	0.7-1.0
G35A36			1.46	0.45	0.5		0.33	0.7-1.0
C35B30	C		1.82	0.51	1.0		0.91	2.0-3.7
G35B30	C+Sg		1.78	0.50	0.5		0.91	0.8-2.0
G35B36			1.46	0.45	0.5		1.00	0.8-1.5
C50A30	C	50	2.68	0.56	1.0	0.61	0.9-5.4	
C50A36			2.32	0.52	1.0	0.67	0.8-3.5	
G50A30			C+Sg	2.64	0.55	0.5	0.61	0.6-1.8
G50A36				2.20	0.50	0.5	0.67	0.6-1.5

[Notes] C: Cement (kg/m<sup>3</sup>), Si: Silica fume (kg/m<sup>3</sup>), Sg: Ground granulated blast furnace slag (kg/m<sup>3</sup>), B: Binder (C+Sg+Si), S: Sand (kg/m<sup>3</sup>), W: Water (kg/m<sup>3</sup>), s/m: Volumetric ratio of sand to mortar, SCA: Segregation control agent (kg/m<sup>3</sup>), A and B are cellulose-ether type and bio-polymer type, respectively, HAE: High-range water reducing AE agent (%/B).

実験-3では、表-3に示すように水結合材比、結合材種別、分離低減剤種別および単位粗骨材量が異なるコンクリートを作成し、そのマトリックスモルタルをウェットスクリーニングで抽出して各種高流動モルタルの付着特性を測定した。水結合材比は35%および50%の2水準（それぞれの単位水量は170kg/m<sup>3</sup>および180kg/m<sup>3</sup>）とし、結合材はセメントと高炉スラグ微粉末からなる2成分系としたが、水結合材比が35%のモルタルについては、セメント単味およびシリカフューム（アンデシファイド形、比表面積20,000m<sup>2</sup>/kg）を併用したシリーズも加えた。分離低減剤としてはセルローズエーテル系および多糖類系の2種類（それぞれAタイプおよびBタイプと略す）である。また単位粗骨材量を0.30m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>および0.36m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>の2水準とした高流動コンクリートのマトリックスモルタルを用いている。さらに、実験-3では、スランプフロー値が500mm、600mmおよび700mm台となるようにHAEの添加量を3段階に調節した。

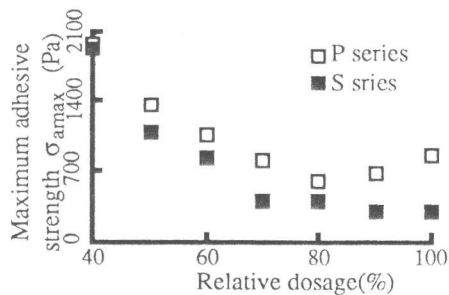
### 3. 付着性状

直接引張付着試験では、付着板の引上げによって徐々に荷重が増加し、その後、試料断面の減少とともに荷重が低下するような測定結果が得られた。試料によって、モルタルが付着板近傍で剥離する場合と、試料が途中で破断する場合があるが、本実験の範囲では、大半の試料が後者のパターンであった。

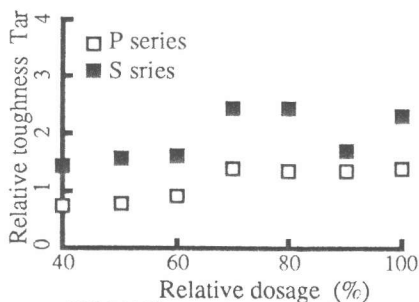
#### 3.1 付着応力曲線

測定されたフレッシュモルタルの付着応力 ( $\sigma_a$ ) - 変位 ( $\Delta$ ) 関係（以下、付着応力曲線と呼ぶ）の一例を図-2に示す。普通モルタルN-50の場合は、最大付着応力 ( $\sigma_{amax}$ ) を示した以降、付着応力が急速に低下するが、シリカフュームを添加したS-10の場合は、最大付着応力はかなり小さいが、ピーク以降は付着応力が緩やかに低下する。フレッシュモルタルの付着特性は、最大付着応力だけでなく、付着応力曲線の形状についても注目する必要がある。

付着応力曲線の形状を定量的に評価するため、最大付着応力時の変位を降伏変位 ( $\Delta a$ ) と呼び、付着応力および変位をそれぞれ最大付着応力および降伏変位で除して（それぞれ相対付着応力および相対変位と呼ぶ）無次元化



(a) 最大付着応力 ( $\sigma_{amax}$ ) と HAE 添加量の関係



(b) 相対付着タフネス (Tar) と HAE 添加量の関係

図-3 PシリーズおよびSシリーズの付着特性

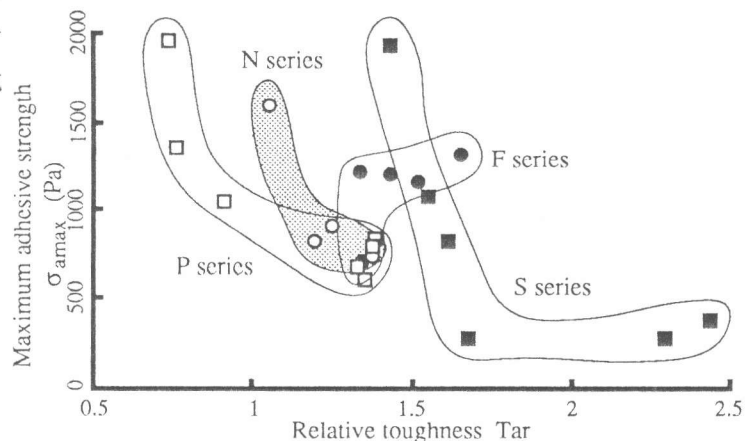


図-4 最大付着応力 ( $\sigma_{amax}$ ) と相対付着タフネス (Tar) の関係 (実験-1 および実験-2)

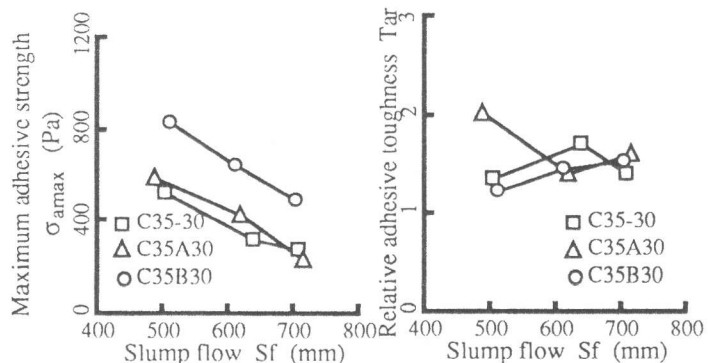


図-5 分離低減剤の種別が付着特性に与える影響

した相対付着応力曲線を得た。さらに、相対付着応力曲線の積分値を相対付着タフネス (Tar) と定義して以下の考察に用いた。なお、付着タフネス (Ta) の絶対値は、相対付着タフネス (Tar) に最大付着応力 ( $\sigma_{\text{amax}}$ ) および降伏変位 ( $\Delta a$ ) を乗じることによって求められる。

SシリーズおよびPシリーズの最大付着応力 ( $\sigma_{\text{amax}}$ ) および相対付着タフネス (Tar) とHAEの添加量の関係を図-3に示す。図-3(a)より明らかなように、最大付着応力は、添加量が基準値の50~100%の範囲ではほとんど変化せず、それ以下になると顕著に増加する傾向を示す。また、図-3(b)によれば、相対付着タフネスは、最大付着応力ほど大きな変動はないが、HAEの増加によって若干大きくなる。

### 3.2 HAE添加量および細骨材濃度の影響

図-4に、実験-1および実験-2より得られた最大付着応力 ( $\sigma_{\text{amax}}$ ) と相対付着タフネス (Tar) の関係を示す。PシリーズおよびSシリーズでは、HAEの添加量の減少とともに、最大付着応力は増加し、相対付着タフネスは減少する傾向を示したが、実験-2で用いた高流動コンクリートのマトリックスモルタル (Fシリーズ) は、HAEの増減には比較的鈍感な付着性状を示した。Fシリーズは、PおよびSシリーズとは異なり、事前にコンクリートとして分離しないことを確認した範囲でHAEを増減させたことと、分離低減剤の混入効果によるものと思われる。一方、細骨材容積率を変化させたNシリーズ (図中のトーンで示した領域) の場合、細骨材容積が増加するにしたがい、最大付着応力が増加する傾向を示した。個々のシリーズでは、最大付着応力の増加にともない相対付着タフネスは減少する傾向が観察されるものの、水結合材比や結合材の種類、細骨材率が異なる各シリーズ間には顕著な相関はみられず、最大付着応力のみで試料の付着特性を論ずることが難しいことがわかる。

### 3.3 分離低減剤および結合材の種類の影響

高流動コンクリートには、分離低減剤を用いる場合が多いが、分離低減剤の種類が付着特性に与える影響は大きいものと予想される。実験-3より得られた高流動モルタルの付着特性に与える分離低減剤の影響を図-5に示す。横軸にはコンクリートとしてのスランプフロー値を示している。今

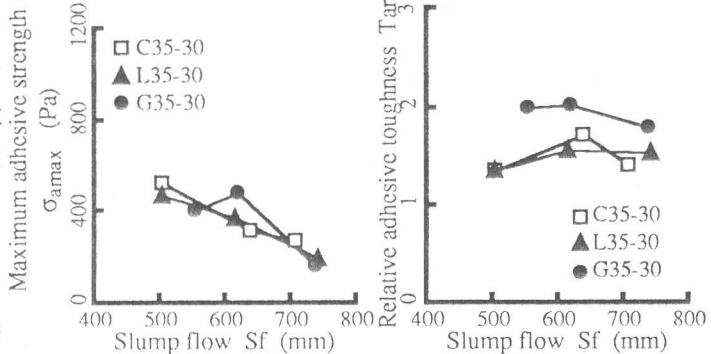


図-6 結合材の種類が付着特性に与える影響

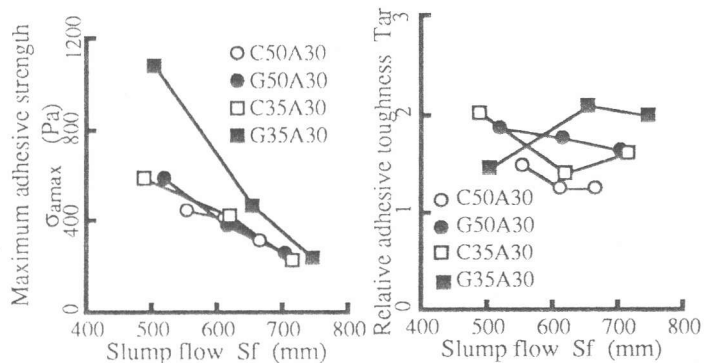
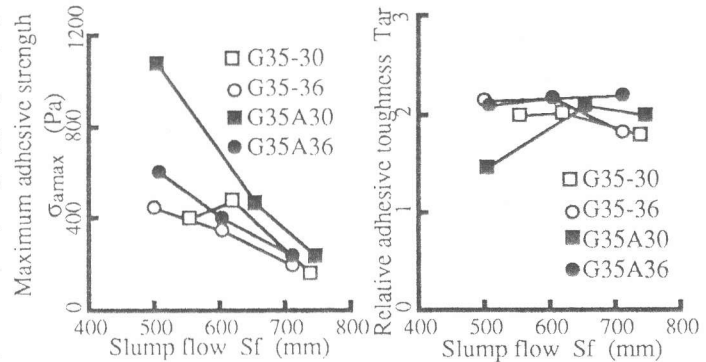
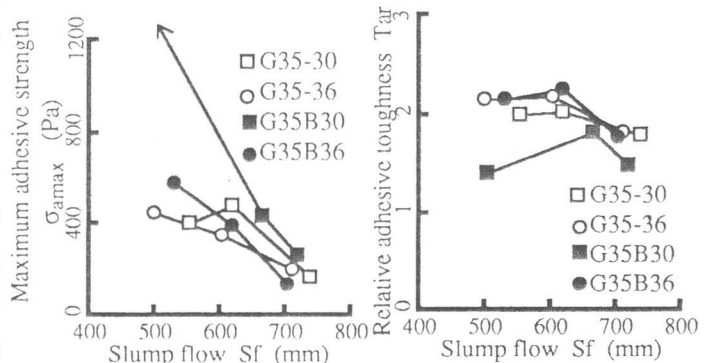


図-7 水結合材比が付着特性に与える影響



(a) Aタイプ増粘材の場合



(b) Bタイプ増粘材の場合

図-8 単位粗骨材量が付着特性に与える影響

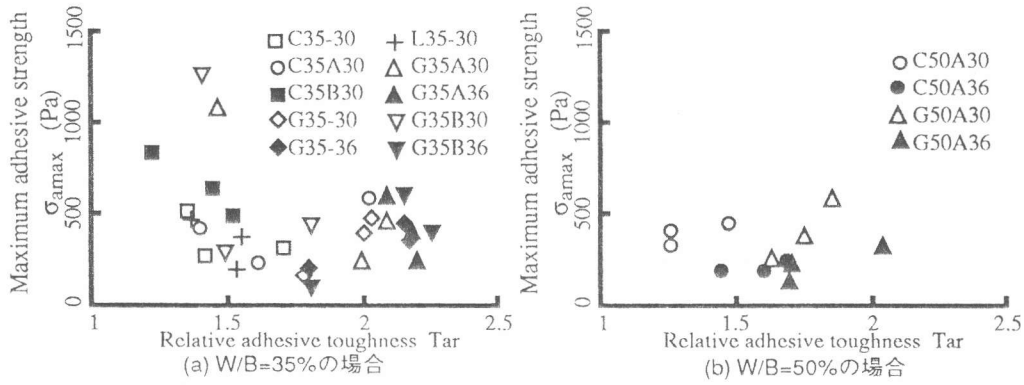


図-9 最大付着応力 ( $\sigma_{max}$ ) と相対付着タフネス (Tar) の関係 (実験-3)

回の調合の範囲では、最大付着応力 ( $\sigma_{max}$ ) は、Bタイプの分離低減剤を用いた場合が他の試料に比べて高い。一方、結合材の種別が付着特性に与える影響を示した図-6によれば、いずれの試料も最大付着応力 ( $\sigma_{max}$ ) には差異が見られないものの、相対付着タフネス (Tar) は、スラグを混入した試料が高い値を示している。

### 3.4 水結合材比の影響

2水準の水結合材比に対して、セメント単味およびスラグも結合材に用いた場合の高流動モルタルの付着特性を、コンクリートとしてのスランプフロー値の関係で整理したものを図-7に示す。水結合材比 (W/B) が35%で分離低減剤を使用した試料 (G35A30) が高い最大付着応力を示したものの、水結合材比と最大付着応力の間には顕著な関係はみられない。一方、相対付着タフネスは、水結合材比が小さい方がやや大きく、また、図-6と同様にスラグを用いた調合の方が大きい結果となった。

### 3.5 単位粗骨材量の影響

粗骨材のインターロックを軽減し、間隙 (鉄筋間) 通過性を改善するためには、単位粗骨材量を調整する必要がある。実験-3では、水結合材比ごとに単位水量が一定であり、粗骨材量を変化させると細骨材量も変化する。単位粗骨材量の違いがモルタルの付着特性に与える影響を図-8に示す。単位粗骨材量が増加 (細骨材容積率が減少) することによって最大付着応力は減少することがわかる。さらに、分離低減剤を使用した場合はこの差が大きくなり、細骨材濃度が付着特性に与える影響が増大する。

### 3.6 最大付着応力と相対付着タフネスの関係

図-9に実験-3で得られた高流動モルタルの最大付着応力 ( $\sigma_{max}$ ) と相対付着タフネス (Tar) の関係を示す。実験-3では、コンクリートのスランプフロー値を500~800mmの範囲でH A Eの添加量を3段階に変化させているが、いずれも高流動コンクリートの必要条件の一つである高い変形能力を有している。同図は、付着特性値が、変形能力とは独立したパラメータであることを示唆している。

## 4. すべり抵抗性状

図-10は、高性能A E減水剤の添加量を変化させた実験-2の高流動モルタルから得られたすべり抵抗応力 ( $\sigma_n$ ) と変位速度 ( $\beta$ ) の関係を示したものである。また、図-11には、図-10より得られた直線の切片および傾き (それぞれすべり降伏値:  $\tau_s$  およびすべり粘性:  $\eta_s$ ) とH A Eの添加量の間を示した。H A E添加量の増加によって、すべり降伏値

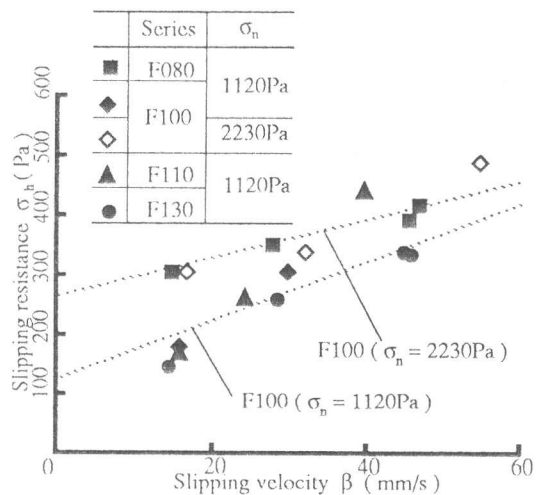


図-10 すべり抵抗応力 ( $\sigma_n$ ) - 変位速度 ( $\beta$ ) 関係の一例

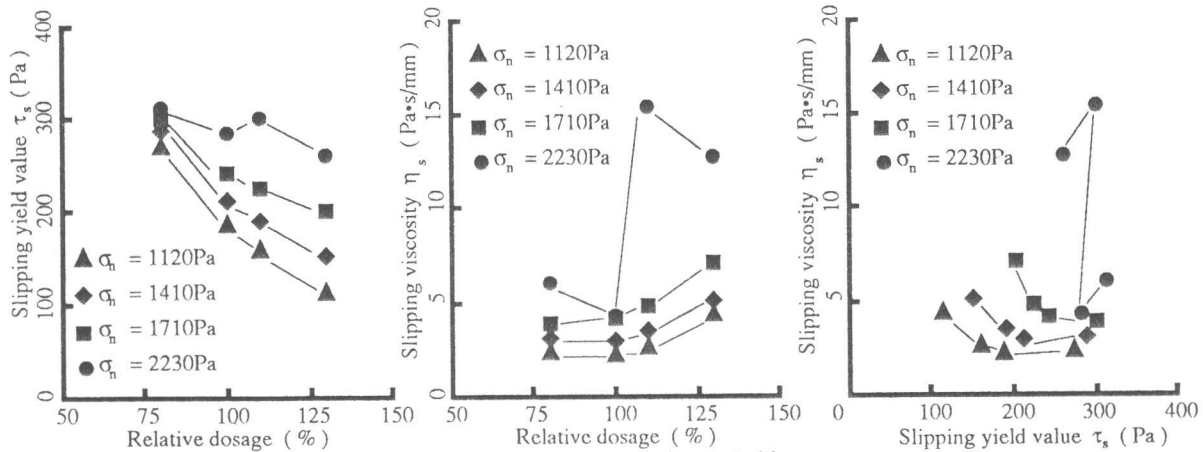


図-11 すべり降伏値( $\tau_s$ )およびすべり粘性( $\eta_s$ )とHAE添加量の関係

図-12 すべり粘性( $\eta_s$ )とすべり降伏値( $\tau_s$ )の関係

( $\tau_s$ )は減少し、すべり粘性( $\eta_s$ )は、わずかに増加する傾向がある。図-12は、すべり粘性( $\eta_s$ )とすべり降伏値( $\tau_s$ )の関係を示したものであるが、垂直応力の増加にともなって2つのすべり定数はともに増加しており、式(1)中の $S_1 \sim S_4$ の定数がいずれも正の値となることわかる。

## 5. まとめ

本研究では、フレッシュコンクリートの付着特性に関する実験データを収集するために、主として高流動コンクリート中のモルタルを試料として直接引張試験およびすべり抵抗試験を行った。モルタルの付着力は、その変形に関するレオロジー性質とは独立した性質であり、ペーストの物性および細骨材濃度に影響される。また、本研究では、高流動コンクリートのマトリックスモルタルのすべり抵抗性に関する基礎的な傾向を明らかにした。

## [謝辞]

本研究に際して、三宅博君(名古屋大学学生)の助力を得た。また、本研究の一部は、日本建築学会高流動コンクリート研究小委員会フレッシュWGが行った共同実験の結果を参考にした。本研究費の一部は、平成5年度文部省科学研究費補助金特別研究員奨励研究、同一般研究(C)ならびに日本板硝子材料工学助成会研究助成金によった。付記して謝意を表す。

## [引用文献]

- [1] 谷川恭雄, 森博嗣, 田中政史, 梅本宗宏, 黒川善幸: フレッシュコンクリートと鋼板のすべり抵抗性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.111-112, 1987.10.
- [2] 井上和政, 和泉意登志, 戸田彰彦, 阿部靖弘, 田中恭一, 橋爪進: 超ワーカブルコンクリートの調合設計に関する基礎研究(その2 超ワーカブルコンクリートを構成するフレッシュモルタルの粘性特性と付着特性に関する一考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.917-918, 1992.8.
- [3] 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究委員会報告書(D), 212pp., 1993.5.
- [4] 谷川恭雄, 森博嗣, 三輪正保: 高強度コンクリートの材料分離性状に関する実験的研究, セメント技術大会講演集, Vol.45, pp.212-217, 1991.