

論文

[1071] フレッシュコンクリートのスランプ試験およびスランプフロー試験に関する研究

黒川善幸\*1・谷川恭雄\*2・森 博嗣\*3・小村理恵\*4

1. まえがき

フレッシュコンクリートの代表的なコンシステンシー試験であるスランプ試験は、品質管理試験として定着している一方、レオロジーに基づく理論的な検討も行われている[1-3]。これらのうち、降伏値をスランプ値と関連付ける研究結果は比較的多く[1-3]、ほぼ一致した見解が得られているが、塑性粘度は流動速度に関するパラメータであり、通常のスランプ試験から得られる試験値から検出することは困難である。しかし、高強度コンクリートや高流動コンクリートなどでは粘性の把握が重要なため、スランプ試験時に、コンクリート上面の降下量-時間曲線（スランピング曲線）を測定し、この結果から塑性粘度を推定する方法や[4]、所定のスランプフロー値に到達するまでの時間を測定し、これを粘性の指標とする方法が試みられている[5-7]。

本報では、筆者らが先に提案したスランピング理論[4]によるレオロジー定数推定法を整理・拡張するとともに、スランプ試験時の挙動に影響を与える各種の要因を粘塑性有限要素法[VFEM]による数値解析結果を用いて検討する。

2. スランプ試験と測定項目

スランプ試験およびスランプフロー試験を拡張した試験より測定される項目を以下に示す。

- 1)スランプ値 $SL$ (cm)
- 2)スランプフロー値 $Sf$ (mm)：静止した試料の横方向の広がり。直交する2方向について測定する。
- 3)スランピング曲線 $sl-t$ ：試料上面の降下量(スランピング値 $sl$ )の時刻変化曲線。
- 4)スランプフローイング曲線 $sf-t$ ：スランプフローイング値 $sf$ の時刻変化曲線。正確な測定は困難であるが、所定のスランプフローイング値 $sf$ への到達時間により、およその形状が測定できる。

図-1に、スランプ値 $SL$ とスランプフロー値 $Sf$ の関係の一例を示す。試料の体積が一定であることから、スランプ値 $SL$ は、スランプフロー値 $Sf$ の2乗にほぼ反比例する。図中には、スランピング後の試料の形状を上面半径：下面半径=1：2の円錐台形と仮定した場合の理論曲線を併示したが、スランプフロー値 $Sf$ が300mmを超えるような試料では実験と理論の結果はよく一致している。

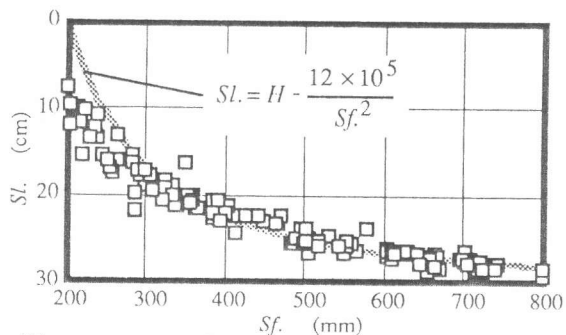


図-1 スランプ値 $SL$ とスランプフロー値 $Sf$ の関係

\*1 名古屋大学助手 工学部建築学科、工修（正会員）  
 \*2 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博（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 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻

### 3. 理論式によるレオロジー定数の推定

#### (1) 降伏値 $\tau_y$ (Pa)

降伏値  $\tau_y$  は、静的な外力の釣合いから、それぞれスランプ値  $Sl$  またはスランプフロー値  $Sf$  の関数として求められる [1-3]。密度  $\rho=2300\text{kg/m}^3$  の試料の降伏値の算定式を以下に示す。

$$\tau_y(Sl.) = \frac{7\rho G(H-Sl.)}{1200\sqrt{3}} = 76.0(H-Sl.) \quad (1)$$

$$\tau_y(Sf.) = \frac{\rho G Vol.}{25\sqrt{3}\pi Sf.^2} \times 10^8 = \frac{9.12}{Sf.^2} \times 10^7 \quad (2)$$

ここに、 $G$ :重力加速度( $=9.8067\text{m/s}^2$ )、 $H$ :初めの高さ( $=30\text{cm}$ )、 $Vol.$ :スランプコーンの容積( $\text{m}^3$ )

図-2に、式(1)および(2)より推定した降伏値  $\tau_y(Sl.)$  および  $\tau_y(Sf.)$  の比較を示す。 $\tau_y(Sl.)$  が  $200\text{Pa}$  以下のスランプ値が大きい試料では、最終形状はほとんど平らな皿状になるため、円錐台の仮定による理論値より実測のスランプフロー値が小さくなり、 $\tau_y(Sf.)$  の方が大きな値をとる。逆に  $\tau_y(Sl.)$  が  $200\text{Pa}$  を超える試料では、試料が下部が広がった形状となり、実測のスランプフロー値が理論値より大きく、 $\tau_y(Sf.)$  の方が小さくなる。図-3に、式(1)および(2)より推定した降伏値  $\tau_y$  とスランプフロー値  $Sf$  の関係を示す。スランプフロー値が大きい範囲では、降伏値はほぼ線形に減少する。

#### (2) 塑性粘度 $\eta$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

塑性粘度  $\eta$  は、理論曲線と実測のスランピング曲線の曲率を比較することによって求められる [4]。密度  $\rho=2300\text{kg/m}^3$  の場合のスランピング曲線の理論式は、以下に示すような時間  $t$  (s) の双曲線関数として表される。

$$sl. = Sl. - \frac{1}{\frac{7\rho G}{7200\eta}t + \frac{1}{Sl.}} = Sl. - \frac{1}{\frac{21.9}{\eta}t + \frac{1}{Sl.}} \quad (3)$$

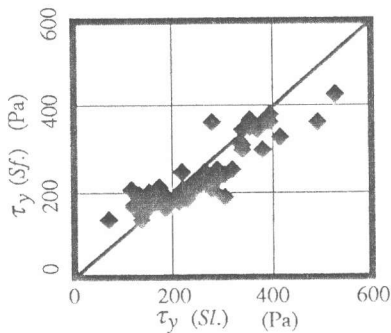


図-2 降伏値  $\tau_y$  の推定値の比較

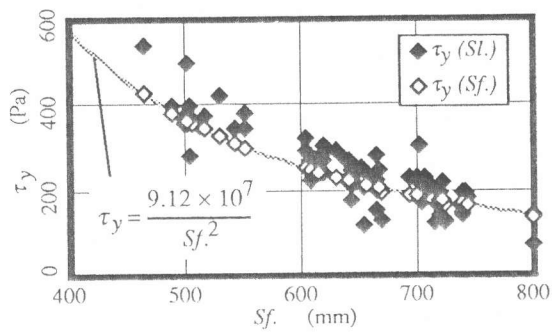


図-3 降伏値  $\tau_y$  とスランプフロー値  $Sf$  の関係

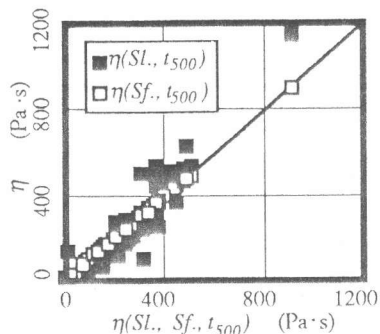


図-4 塑性粘度  $\eta$  の推定値の比較

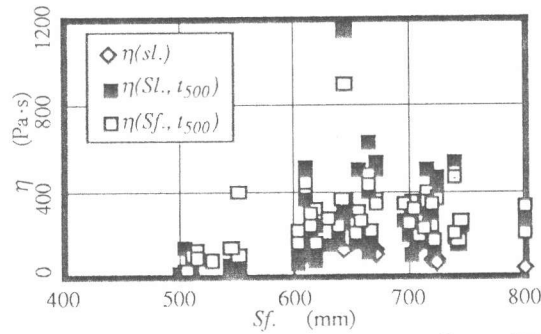


図-5 塑性粘度  $\eta$  とスランプフロー値  $Sf$  の関係

スランプフローイング到達時間 $t_{sf}$ より塑性粘度 $\eta$ を推定する場合には、以下に示す式を用いる[7]。これらの式では、スランプフローイング値 $s_f$ が500mmに到達する時間 $t_{500}$ を用いたものである。試料の上面と下面の比が一定であると仮定すると、塑性粘度 $\eta$ は、スランプ値 $Sl$ またはスランプフロー値 $Sf$ のいずれかの値と時間 $t_{500}$ より求められる。

$$\eta = \frac{7\rho G Sl \{sf^2(Sl - H) + D^2 H\}}{7200(sf^2 H - D^2 H)} t_{sf}, \quad \eta(Sl, t_{500}) = (0.870 Sl^2 - 21.9 Sl) t_{500} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{7\rho G D^2 H (Sf^2 - D^2) (Sf^2 - sf^2)}{7200 Sf^4 (Sf^2 - D^2)} t_{sf}, \quad \eta(Sf, t_{500}) = 125.3 \left(1 - \frac{4 \times 10^4}{Sf^2}\right) \left(1 - \frac{25 \times 10^4}{Sf^2}\right) t_{500} \quad (5)$$

ここに、 $D$ :スランプコーンの底面の直径(=200mm)

また、上下面の半径比をスランプ値 $Sl$ とスランプフロー値 $Sf$ により補正した場合の塑性粘度 $\eta$ を求める理論式を以下に示す。

$$\eta = \frac{7\rho G D^2 H Sl (Sf^2 - sf^2)}{7200 Sf^2 \{sf^2 H - Sf^2(H - Sl)\}} t_{sf}, \quad \eta(Sl, Sf, t_{500}) = \frac{2631 Sl}{75 \times 10^5 - Sf^2(30 - Sl)} \left(1 - \frac{25 \times 10^4}{Sf^2}\right) t_{500} \quad (6)$$

理論曲線は、時間 $t$ が無限大のとき、最終スランプフロー値 $Sf$ に収束するため、時間を測定したスランプフローイング値 $s_f$ が $Sf$ に近い場合、塑性粘度の推定精度は低くなる。

図-4は、式(4),(5),(6)を用いて、高流動タイプのコンクリートの塑性粘度を推定した結果を比較したものである。図より明らかなように、 $\eta(Sf, t_{500})$ は $\eta(Sl, Sf, t_{500})$ とほぼ等しく、このような試料では、式(5)を用いた塑性粘度の推定方法が簡便で実用的といえる。

図-5は、実測のスランピング曲線を式(3)と比較して求めた塑性粘度 $\eta(sl)$ と、 $\eta(Sf, t_{500})$ および $\eta(Sl, Sf, t_{500})$ を比較したものである。 $\eta(sl)$ は、 $\eta(Sf, t_{500})$ や $\eta(Sl, Sf, t_{500})$ より値がかなり小さく、変化が少ない。これは、比較に用いた実測曲線が、スランプ値 $Sl$ がほぼ同一で、スランプフロー値 $Sf$ が異なる試料より得られた結果であるためである。

#### 4. スランピング挙動に影響を与える要因

スランピング挙動は、試料の境界面などの拘束が少ない条件下の流動であり、理論的にも解析的にも比較的取り扱いやすい問題といえるが、実際の流動現象には、数多くの要因が複雑な影響を与える。ここでは、体積弾性を考慮した動的粘塑性有限要素法(VFEM)[8]により求めたスランピング挙動の解析結果との比較などから、本理論上の仮定の妥当性について検討する。

$\tau_y=500\text{Pa}$     --- tensile stress  
 $\eta=600\text{Pa}\cdot\text{s}$     — compressive stress  
 $t=0.02\text{s}$

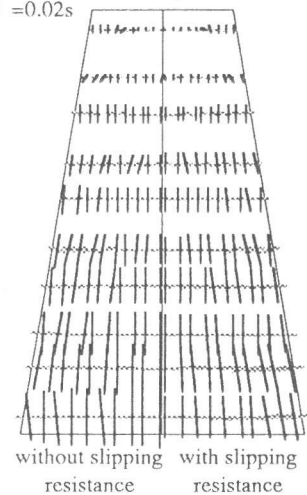


図-6 試料内部の応力分布(VFEM)

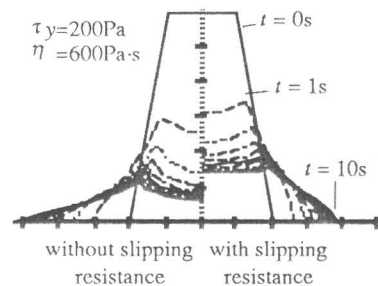


図-7 試料の変形(VFEM)

### (1) 応力分布

図-6にVFEMによって得られたスランピング初期(0.02秒後)の応力分布を示す。図には各要素の各積分点における主応力を示した。図から明らかなように、初期形状においては、鉛直方向に圧縮応力が、また、水平方向に引張応力がそれぞれほぼ均等に生じており、底面におけるすべり抵抗応力の影響はこの時点ではほとんど見られない。

### (2) 試料の流動形状

本理論では、スランピング中の形状は常に円錐台形であると仮定しているが、実際のスランプ試験後の試料の形状は、モルタルの流動性や粗骨材量によって様々である。

図-7にVFEMによる試料の変形の一例を示す。図より、底面のすべり抵抗がない場合は、試料上面が大きく凹みスランプフローが大きく広がるのに対して、すべり抵抗がある場合は、スランプフローが小さく抑えられ、全体として円錐台形を保っていることがわかる。

図-8に、本理論およびVFEMによって得られたスランピング値 $sl$ とスランプフローイング値 $sf$ の関係を示す。図中の曲線は塑性粘度を変化させてもほとんど変化しない。また、すべり抵抗を考慮しないVFEMと本理論による結果では、降伏値を変化させてもほぼ同じ曲線上にある。図より明らかなように、すべり抵抗を考慮したVFEMの結果は、円錐台形を保つために理論曲線とほぼ一致した変形経路をたどることがわかる。

図-9に、VTRより測定したフレッシュコンクリート(水セメント比30%)のスランピング曲線とスランプフローイング曲線を示す。試料はまず高さ方向に縮み、横方向にやや遅れて広がる傾向がある。また、コーンの接触による影響を受けにくいスランプフローイング曲線の方がスランピング曲線よりなめらかな曲線となり、高流動コンクリートでは、この傾向が顕著である。

### (3) 底面におけるすべり抵抗

図-10は、本理論とVFEMによるスランピング曲線およびスランプフローイング曲線を比較したものである。VFEMでは、底面において、すべり速度により線形に変化するすべり抵抗応力を考慮した[8,9]。スランピング曲線に関しては、すべり抵抗を考慮しない解析曲線は、理論曲線とよく一致しているが、最終スランプ値 $SL$ はやや小さく、曲率はやや大きくなる。すべり抵抗を考慮した解析曲線では、その傾向が顕著になっている。したがって、本理論による推定値は、降伏値を大きめに、塑性粘度を小さめに見積もる。一方、スランプフローイング曲線でも、スランピング曲線の場合と同様の傾向がみられるが、スランプフロー値の差はかなり大きくなる。この原因の一つとして、解析に用いたすべり抵抗力に関する係数[9]が正確な値でないことが考えられ、これに関する情報を収集する必要がある。

図-11に、スランピングの実測曲線と理論曲線およびすべり抵抗を考慮したVFEMによる解析曲線を示す。この試料のVFEMによるレオロジー定数の推定値は、降伏値 $\tau_y=100(\text{Pa})$ 、塑性粘度 $\eta=800(\text{Pa}\cdot\text{s})$ となり、理論曲線による推定値は、降伏値 $\tau_y=350(\text{Pa})$ 、塑性粘度 $\eta=500(\text{Pa}\cdot\text{s})$ となった。

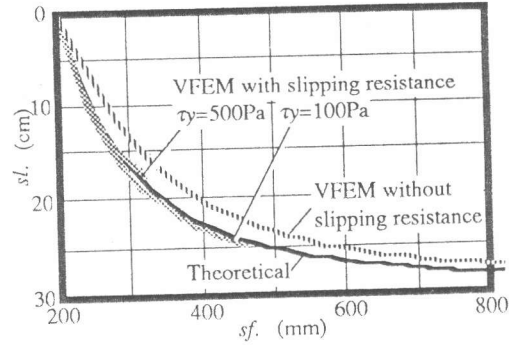


図-8 スランピング値 $sl$ とスランプフローイング値 $sf$ の関係

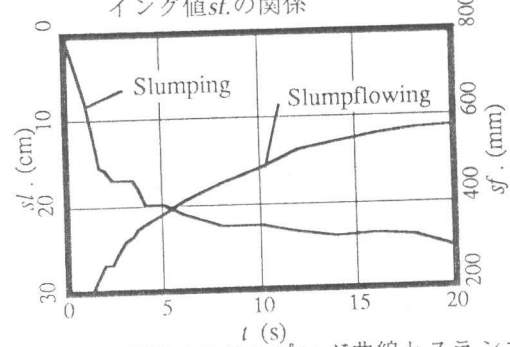


図-9 実測のスランピング曲線とスランプフローイング曲線

(4) 慣性力

本研究のスランピング理論は、静的な力の釣合いを基本として導かれたものであり、慣性力が考慮されていない。したがって、速度の速いスランピング挙動に対しては、推定精度はやや低下する。図-12にスランピング曲線の初動を示す。VFEMは動的解析であり、慣性力の影響が考慮されているが、高流動タイプの試料では高粘性により流動が遅いため、この影響はごく小さい。

(5) スランプコーンによる流動の抑制

スランプコーンを引き上げる時に、試料はコーン内壁に接触している間、横方向への流動を拘束され、スランピングの初動はこの影響を受ける。筆者らは、以前にコーン引き上げ速度とスランピング曲線との関係を解析的に求めた結果を報告した[3]。また、図-11に示した実測のスランピング曲線からも、コーンによって試料の流動が最初の1.2秒間拘束されている様子がわかる。したがって、スランピング曲線に本理論を適用する場合にはこの範囲を除く必要がある。

(6) スランプコーンの寸法・形状

コンクリートの性状が多様化している現在では、通常型のスランプコーンが最適な寸法・形状とは限らない。本理論は、異なる寸法・形状にも適用可能であるが、良好な推定精度が得られる範囲については、今後検討する必要がある。

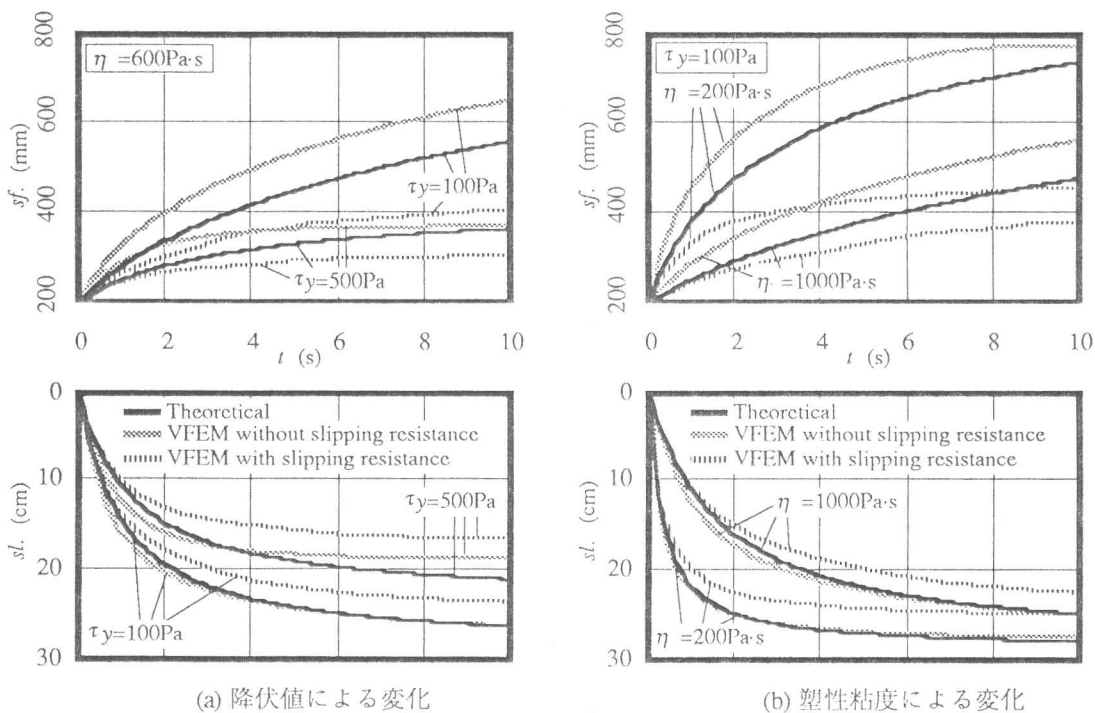


図-10 理論と数値解析によるスランプフローイング曲線およびスランピング曲線の比較

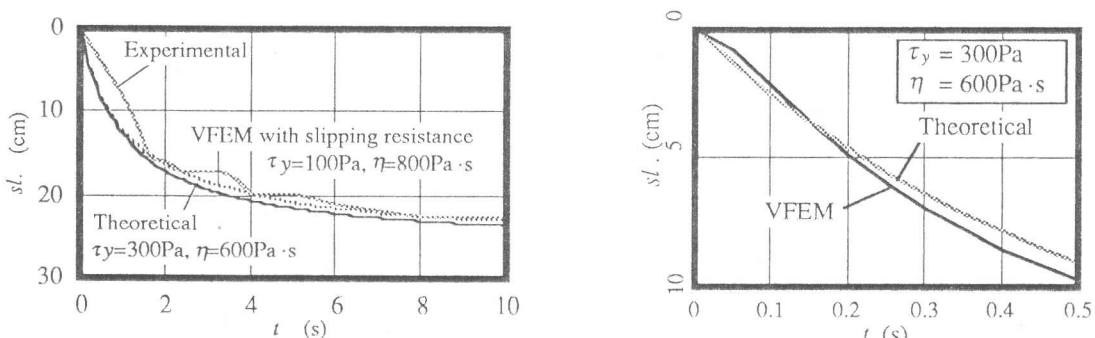


図-11 理論、数値解析および実測によるスランピング曲線の比較(すべり抵抗がある場合)

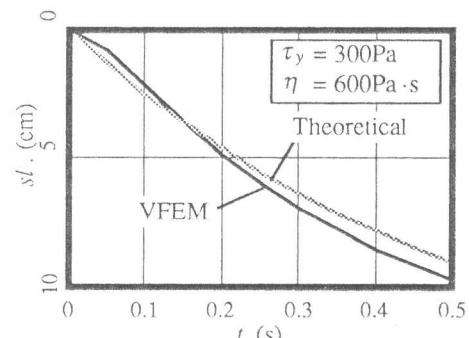


図-12 スランピング曲線の初動

### (7) 試料中の骨材

図-13に、高流動モルタルに粗骨材を外割りで混入した試料(100%:G=860kg/m<sup>3</sup>)のスランプ値、スランプフロー値およびレオロジー定数の変化を示す。このような調合の範囲では、スランプ値よりもスランプフロー値の方が、粗骨材量に敏感に反応することがわかる。

### 5. まとめ

本報では、スランピング理論によるレオロジー定数推定法を進展させた新しい推定方法を提示した。また、粘塑性有限要素法による解析結果や実測結果との比較を行い、スランピング挙動に影響を与える要因を整理し、本理論上の仮定について検討した。

#### 【謝辞】

本研究費の一部は、平成5年度文部省科学研究費補助金・一般研究(C)ならびにセメント協会研究奨励金によった。また、本実験および解析に際し、名古屋大学の西之園一樹君、大同工大の国枝恒裕君の助力を得た。付記して謝意を表す。

#### 【引用文献】

- 1)Murata,J.: Flow and deformation of fresh concrete, *Materiaux et Construction*, Vol.17, No.98, pp.117-129, 1984.
- 2)水口裕之：コンシステンシー試験値間の関係，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.7, pp.297-300, 1985.6.
- 3)谷川恭雄・森博嗣：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法 —スランプ値から何がわかるか—，コンクリート工学，Vol.25, No.5, pp.4-16, 1987.5.
- 4)Tanigawa,Y., Mori,H., Kurokawa,Y. and Komura,R.: Rheological Study on Slumping Behavior of Fresh Concrete, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol.14, pp.1-8, 1992.12.
- 5)笠井芳夫・平石信也・飛内圭之・長田浩治：普通強度フローイングコンクリートの調合・流動性・強度・収縮に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.79-84, 1992.6.
- 6)山口昇三・岸谷孝一・杉本貢・山本常夫：ポリカルボン酸系高性能AE減水剤を用いた超流動コンクリートの研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A, pp.929-930, 1992.8.
- 7)Kurokawa,Y., Tanigawa,Y., Mori,H. and Komura,R.: Study on Slumping Test of Fresh Concrete, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol.15, pp.55-62, 1993.12.
- 8)Tanigawa,Y., Mori,H., Kurokawa,Y. and Odaka,S.: Flow Simulation of Fresh Concrete by Dynamic Viscoplastic Analysis, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol.14, pp.9-16, 1992.12.
- 9)森博嗣・谷川恭雄：振動力を受けるフレッシュコンクリートの流動解析法，日本建築学会構造系論文報告集，No.388, pp.18-27, 1988.6.

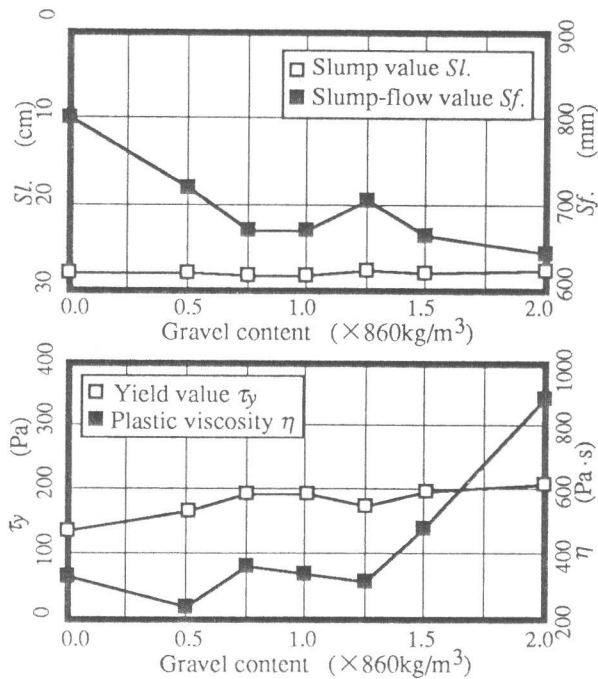


図-13 粗骨材混入率とスランプ値、スランプフロー値およびレオロジー定数の関係