

論文

[1058] フレッシュコンクリートのスランピング試験に関する研究

黒川善幸*1・谷川恭雄*2・森博嗣*3・小村理恵*4

1. まえがき

近年、多種多様な性質のフレッシュコンクリートが実用されるようになり、その性状をレオロジーに基づいて正確に把握・評価する技術の開発が重要視されている。筆者らは既に、フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価手法として、スランプ試験を拡張したスランピング試験を行い、降伏値をスランプ値から、塑性粘度をコンクリート上面の降下量-時間曲線(スランピング曲線)からそれぞれ推定する方法を提案した[1]。この推定法の基礎となる理論は、多くの仮定・近似が含まれており、実用化に向けて、より詳細な検討が必要であり、本報では、スランピング中の試料の形状に関する仮定について再検討した。

また、スランピング試験には多少大がかりな測定装置が必要となるため、現場における品質管理手法として手軽な方法とはいえない。さらに、最近開発された高流動コンクリートに対して、スランプ試験時に試料の広がり(スランプフロー)を管理指標として用いるケースが多くなってきている[2-3]。そこで、本研究では、スランプフローの時刻変化曲線(スランプフローイング曲線)から粘性を推定する方法についても併せて検討を行った。

2. スランピング曲線

スランピング中の試料の形状を図-1に示すような単純な円錐台と仮定すると、試料の体積Vol.(m³)は、スランピングsl.(cm)とスランプフローイングsf.(mm)を用いて次のように表すことができる。

$$Vol. = \frac{\pi\alpha}{4} (H - sl.) sf.^2 \times 10^{-8}, \quad \alpha = \frac{1 + a + a^2}{3} \tag{1}$$

ここに、a: 上面半径と下面半径の比(0 < a < 1), α: 形状のパラメータ, H: 初めの高さ(=30cm)

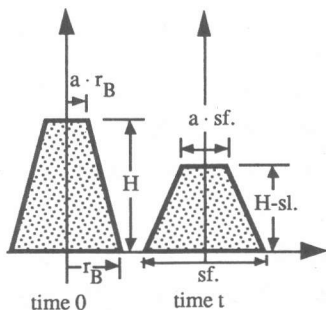


図-1 スランピング中の試料の形状

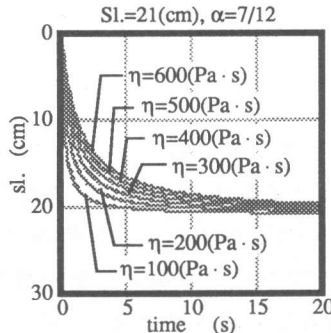


図-2 スランピング曲線に与える塑性粘度ηの影響

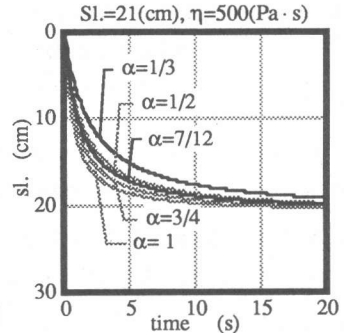


図-3 スランピング曲線に与える形状のパラメータαの影響

*1 名古屋大学 工学部建築学科 助手, 工修 (正会員) *2 同教授, 工博 (正会員)
*3 同助教授, 工博 (正会員) *4 同大学院生

この時、スランピングsl.は次式に示すように、塑性粘度 η を含み、最終的なスランプ値Sl.(cm)に漸近する双曲線となる[1]。

$$sl. = Sl. - \frac{1}{\frac{\alpha\rho G}{600\eta}t + \frac{1}{Sl.}} \quad (2)$$

ここに、 ρ ：試料の密度(kg/m³)、 G ：重力加速度(=9.8067m/s²)

式(2)より、塑性粘度 η および形状のパラメータ α は、スランピング曲線の曲率に影響する要因であることがわかる。塑性粘度を変化させたフレッシュコンクリート(密度 $\rho=2300\text{kg/m}^3$ 、スランプ値 $Sl.=21\text{cm}$)のスランピング曲線を図-2に示す。形状のパラメータ α は、実際にはスランピング中に時刻とともに絶えず変化している。スランピング曲線の測定は、その曲率から塑性粘度を推定することを目的としているので、形状のパラメータ α の時刻変化は、推定結果の精度に直接的な影響を与える。理論式(2)によるスランピング曲線に与える形状のパラメータ α の影響を図-3に示す。なお、スランピング中は、通常 $1/3 < \alpha < 1$ の範囲内にあり、この範囲内では、 α の変化によるスランピング曲線の曲率への影響は、あまり大きくないことがわかる。なお、 α は最終的なスランプ値Sl.には影響を与えない。

(1) $\alpha = \alpha_0$ の場合

スランピング開始時の試料の形状は、上面半径が底面半径の1/2であり、 $\alpha = 7/12 (= \alpha_0 \text{ とする})$ となる。既報では、形状のパラメータ α の値を単純に一定の値とするために、 α_0 を代表的な値として使用した[1]。しかし、スランピング停止前後の形状は、コンクリートの調合によって大きく異なり、初期値 α_0 による近似では、これらの影響要因を反映した評価とはいえない。

(2) $\alpha = A$ の場合

式(1)を α について解き、スランピングが停止したときのスランプ値Sl.(cm)およびスランプフロー値Sf.(mm)の測定値を代入すると、最終的な形状のパラメータAは、式(3)より得られる。

$$A = \frac{\text{Vol.} \times 4 \times 10^8}{\pi(H - Sl.)Sf.^2} \quad (3)$$

図-4に、実験より得られたスランプ値Sl.とスランプフロー値Sf.の関係を示す。また、式(3)を用いて算出した最終形状のパラメータAとスランプフロー値Sf.およびスランプ値Sl.との関係を、それぞれ図-5および図-6に示す。

図-4に示したように、スランプフロー値は、実験の範囲内ではスランプ値の2乗と相関がある。また、式(3)よりAを変化させた場合のスランプフロー値とスランプ値の関係を同図中に併示した。図-5によれば、スランプフロー値Sf.の増加に伴って、Aの値は線形に減少する傾向にある。これほど顕著ではないが、スランプ値Sl.とAの間にも図-6に示すように同様な相関がみられる。一方、試料の粘性に関係するとと思われる水セメント比の違いは、これらの相関関係に大きな影響を与えていない。

以上より、最終形状のパラメータAは、試料の粘性よりも、スランプフロー値Sf.に強く影響を受けていることがわかる。

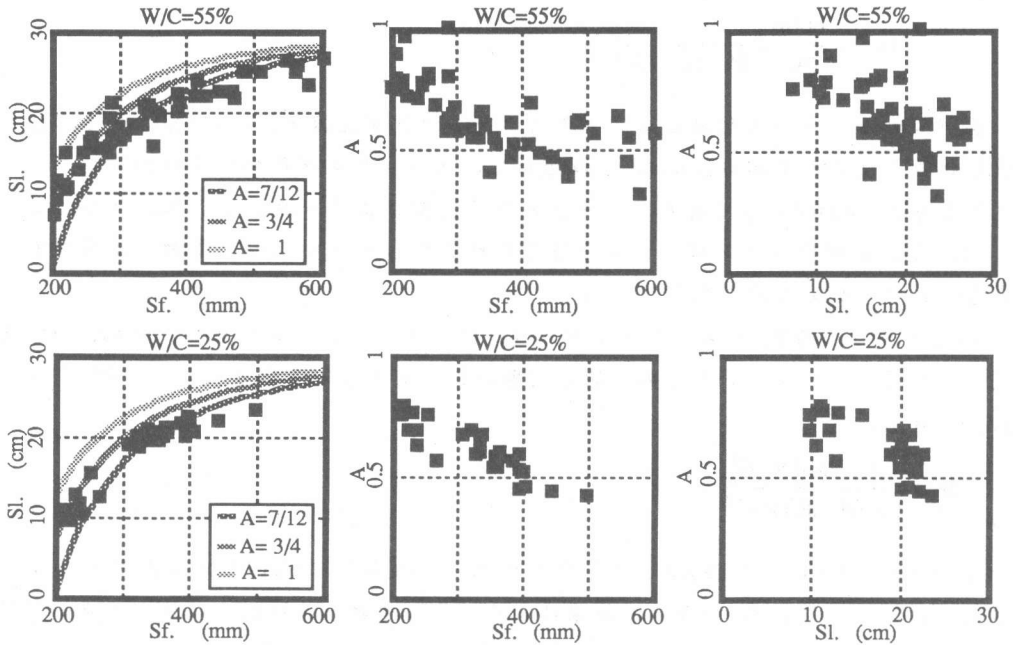


図-4 スランプフロー値Sf. とスランプ値Sl.の関係 図-5 スランプフロー値Sf. とAの関係 図-6 スランプ値Sl. とAの関係

スランプ試験の際に、試料の上面半径とスランプフロー値を測定し、両者の比率より求めた値を A_M とする。この A_M の値と式(3)より求めたAを比較した結果を、図-7に示す。同図において、測定値 A_M が計算値Aよりも小さい試料では、実際の試料の形状が単純な円錐台ではなく、側面が曲面状にふくらんでいる。測定値 A_M が計算値Aよりも大きくなる傾向は、図-8に示したように、スランプフロー値Sf.が大きい試料ほど顕著である。スランピングの理論解析では、試料の最上面付近は自重による圧力を受けないので、内部応力が非常に小さく、ほとんど変形しない結果となる[1]。しかし、スランプフロー値が大きい試料では、試料の下部より速く広がり、外周方向に崩れるものが多い。

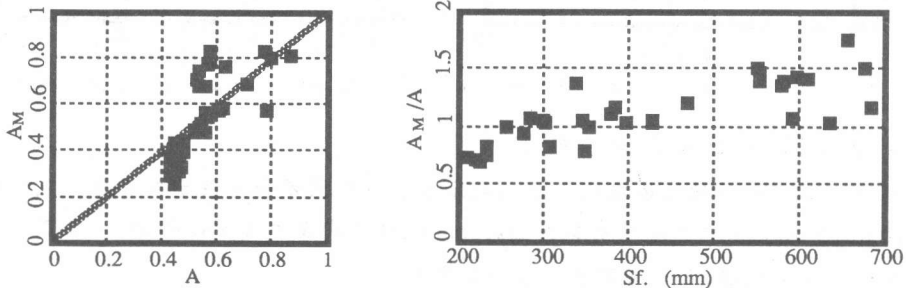


図-7 実測値 A_M と計算値Aの比較 図-8 A_M/A とスランプフロー値Sf.の関係

(3) $\alpha = \alpha(t)$ の場合

実際の形状のパラメータ α は、 α_0 を初期値として最終形状のパラメータAに漸近す

る。式(2)を変形すると、時刻 t における形状のパラメータ $\alpha(t)$ は、次のように表せる。

$$\alpha(t) = \frac{600\eta}{\rho G t} \left(\frac{1}{Sl. - sl.} - \frac{1}{Sl.} \right) \quad (4)$$

図-9は、レーザー変位計による実測のスランピング曲線と式(2)で表される理論曲線を比較したものである。 $\alpha = \alpha_0$ と仮定して、スランピング理論により推定された塑性粘度 η は、 $450 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ であり、データと理論曲線はよく一致している。スランピング初期で、実測のスランピングが理論のそれよりも小さいのは、理論では慣性力が考慮されていないためである。

$\alpha(t)$ の値は、時刻 t のスランピング $sl.(t)$ およびスランプフローイング $sf.(t)$ が測定できれば、スランピング中の試料が円錐台形であるという仮定の基に、式(5)より算出できる。

$$\alpha(t) = \frac{\text{Vol.} \times 4 \times 10^8}{\pi (H - sl.) \times sf.^2} \quad (5)$$

図-10は、式(4)、式(5)およびビデオ画面より実測した $\alpha(t)$ を α_0 に対する比率で示したものである。式(5)と実測結果はよく一致しており、形状のパラメータ $\alpha(t)$ に関しては、スランピング中の試料の形状を円錐台としても問題がないことがわかる。また、式(4)の結果は、スランピング開始時に $\alpha(t=0)=0$ 、 $A=\infty$ となっているが、式(4)では、慣性力が考慮されない理論上の仮定が含まれているためであり、式(4)の特性から、スランピング初期と最終値付近における精度が著しく低下する。全体的には、 $\alpha(t)/\alpha_0$ の値は、1.0前後で比較的安定しており、一定値として α_0 を用いる近似は精度上大きな問題はないものと思われる。

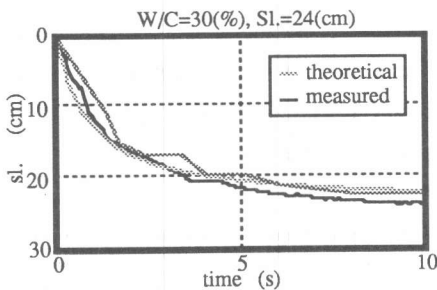


図-9 フレッシュコンクリートのスランピング曲線

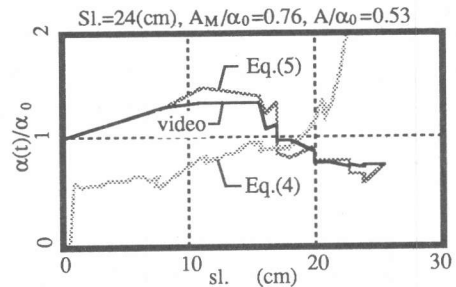


図-10 スランピングと $\alpha(t)/\alpha_0$ の関係

3. スランプフローイング曲線

スランピング中の試料の形状を図-1に示すような円錐台と仮定すると、式(1)および式(2)よりスランプフローイング値 $sf.(mm)$ は、次式のように時刻 t の関数(スランプフローイング曲線)として表すことができる。

$$sf. = 2 \times 10^4 \times \sqrt{\frac{\text{Vol.}}{\pi \alpha (H - sl.)}} = 2 \times 10^4 \times \sqrt{\frac{\text{Vol.}}{\pi \alpha \left(H - Sl. + \frac{1}{\frac{\alpha \rho G}{600\eta} t + \frac{1}{Sl.}} \right)}} \quad (6)$$

図-11に、塑性粘度を100Pa・s～600Pa・sの範囲で変化させた時のスランプフローイング曲線を示す。式(6)より明らかなように、スランプフローイング曲線の曲率は、塑性粘度 η と形状のパラメータ α に影響される。

図-12に、スランプフローイング曲線に与える形状のパラメータ α の影響を示す。同図より、 α の値は、スランプフローイング曲線の曲率以外にも、最終的なスランプフロー値 Sf .に大きな影響を与えており、この点はスランピング曲線の場合(図-3)と傾向が異なっている。したがって、スランプフローイングを測定してフレッシュコンクリートの塑性粘度の推定を行う場合には、 α による補正が必要となる。

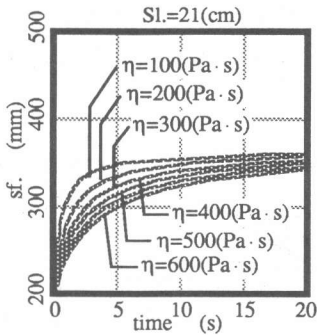


図-11 スランプフローイング曲線($\alpha=7/12$)
に与える塑性粘度 η の影響

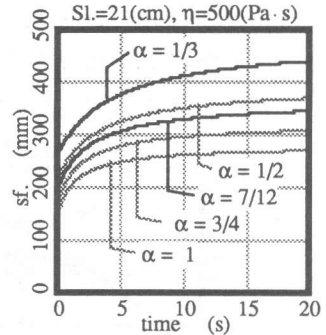
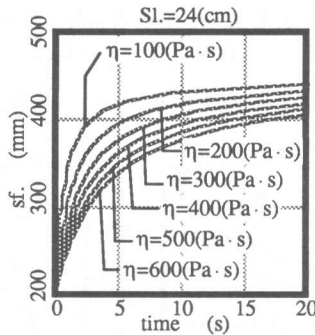


図-12 スランプフローイング曲線
に与える形状の
パラメータ α の影響

(1) $\alpha = \alpha_0$ の場合

式(6)を塑性粘度 η について解くと次式が得られる。

$$\eta = \frac{\alpha \rho G Sl. \{ \pi \alpha sf.^2 (Sl. - H) + Vol. \times 4 \times 10^8 \}}{600 (\pi \alpha sf.^2 H - Vol. \times 4 \times 10^8)} t \quad (7)$$

図-13に、特定のスランプフローイング値 sf .までの到達時間 t と、式(7)によって推定される塑性粘度 η の関係を示す。スランプ試験の際に、スランプフローイング sf .がある値に達する時間 t を測定すれば、この図より塑性粘度 η を簡単に推定することができるが、前述の近似を含んでいるため、精度は高くない。

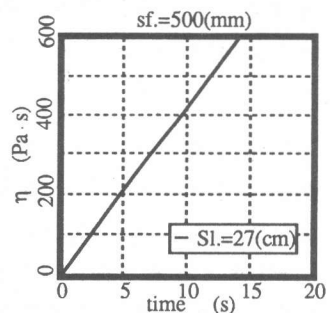
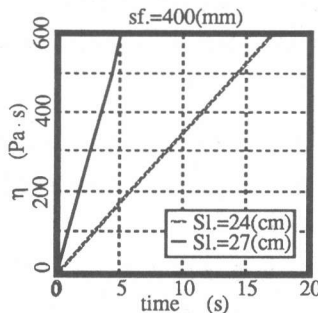
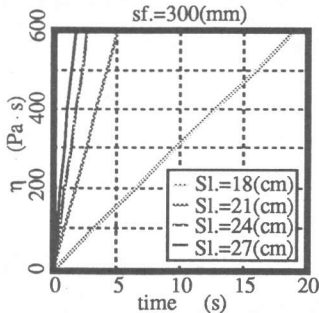


図-13 特定のスランプフローイング値までの到達時間 t と塑性粘度 η の関係

図-14に、実測のスランピング曲線を式(6)により変換したスランプフローイング曲線とビデオ画面によって実測した曲線を示す。同図より明らかなように、この試料の場合、スランピング開始直後には、底面付近の試料のフローが遅れる点が理論

曲線と相違しており、 $sf.=300\sim 400\text{mm}$ の範囲では比較的一致しているものの、その後、実測値は理論値よりも大きくなる。

(2) $\alpha=A$ の場合

図-15に、 $\alpha=A$ を使用した場合のスランプフローイング曲線を示す。この場合、フロー中のデータには相違が見られるものの、最終的なデータはほぼ一致する。したがって、図-14と比較した場合、スランプフローイング曲線に関しては、最終形状のパラメータAを使用の方が実際に近い表現といえる。しかし、塑性粘度の推定に、最終形状のパラメータAを用いることは、スランピング開始直後のデータに対しては精度上問題がある。したがって、比較的大きいスランプフロー値に達するまでの所要時間を計測した場合の方が精度が高くなる。

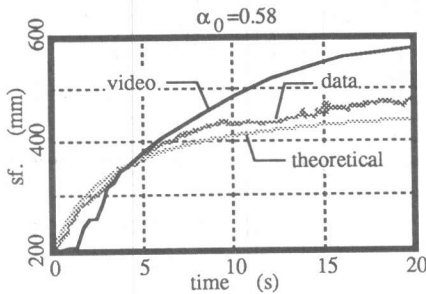


図-14 スランプフローイング曲線に及ぼす α_0 の影響

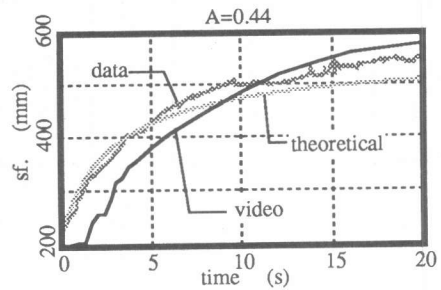


図-15 スランプフローイング曲線に及ぼすAの影響

4. まとめ

本報では、スランピング試験時のコンクリートの流動形状が、スランピング曲線およびスランプフローイング曲線に与える影響について考察した。今後も、理論上の仮定・近似について詳細な考察を行い、スランプ試験のレオロジー試験としての利用方法を検討したい。

なお、本報では国際単位系(SI)を用いた($1\text{Pa}=0.0102\text{gf}/\text{cm}^2$, $1\text{Pa}\cdot\text{s}=10\text{poises}$)。

【謝辞】 本研究費の一部は、平成4年度文部省科学研究費補助金・一般研究(B)、同奨励研究(A)および日本板硝子材料工学研究助成金によった。付記して謝意を表する。

【引用文献】 [1]谷川・森・黒川・小村：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的考察、コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集、JCI, pp.43-48, 1992.

[2]笠井・平石・飛内・長田：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.

[3]山口・岸谷・杉本・山本：ポリカルボン酸高性能AE減水剤を用いた超流動コンクリートの研究(その1.フレッシュコンクリートの性状)、日本建築学会学術講演梗概集、pp.929-930, 1992.