

論文 フレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼす再攪拌の影響

渡辺健治¹ ・ 小野博宣²

要旨：本研究では、フレッシュモルタルおよびコンクリートのレオロジー性質の経時的な変化に加え、再攪拌あるいは試験装置内での静置が、みかけのレオロジー性質に及ぼす影響について検討した。試験前に静置する時間の増加とともに、チクソトロピー性に起因するみかけのレオロジー性質の変化が観察された。

キーワード：フレッシュコンクリート、レオロジー、チクソトロピー

1. はじめに

コンクリートの製造から輸送、場内運搬、打設に至る過程で、ワーカビリティが大きく変化している。

本研究では、ポンプ圧送されたり、配管内で一時的停止したりしたときのコンクリートの品質変化を把握することを最終目的としている。そこで本報では前報¹⁾に引続き、試験容器内で静置したりコンクリートミキサで攪拌することによって、フレッシュコンクリートのレオロジー的な性質がどのように変化するかを実験的に検討した。

2. モルタルの容器内静置実験 (実験-1)

2.1 実験の概要

実験-1では、ポンプ配管の中で停止しているコンクリートの物性の変化を模擬し評価すること最終目的として、2種類の養生下でのフレッシュモルタルのレオロジー的な変化を検討した。実験手順を図-1に示す。初めの方法は、図-1(a)に示すように、通常のフレッシュ性状の経時変化を測定する方法と同様で、本報では便宜的に通常法と呼ぶこととする。この場合、試料はバットの中に放置し、試験容器に充填する直前にハンドスコップで数回攪拌し、十分流動性が回復したことを確認してから試験容器に投入し、充填後すみやかに流動試験を行った。ここでは、静置時間の原点は練上り時点とし、練上りから120分後まで30分ごとに試験を行った。

次の方法では、図-1(b)に示すように、練上り30分に試料を試験容器内に充填した後、静置時間を設け、その後、静かに試料の流動試験を行った。本報では、これを静置法と呼ぶこととした。通常法で試験する場合は、試料は試験直前にアジテートされているものの、静置法で試験する試料は、アジテートされてから時間が経っているため、通常法で試験する試料とは異なる流動性を示すことになる。この流動性の違いをみかけのレオロジー性質の変化と捕らえて検討を試みた。

2.2 レオロジー性質の推定

本研究では、できるだけ容易に静置でき、通常法と静置法の環境の違いがレオロジー性質に及ぼす影響を明確に評価できる試験方法として、0打モルタルフロー試験とJ14ロート流下試験を採用した。0打モルタルフロー試験とはモルタルフロー試験 (JIS R 5201) でフローコーンを引き上げた

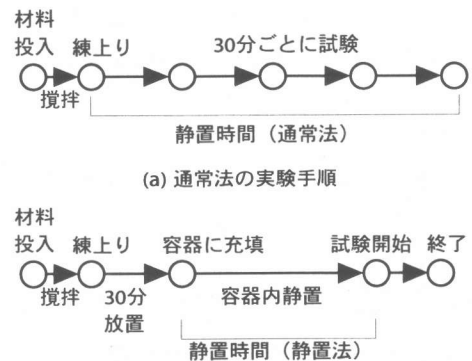


図-1 実験手順

*1 中部大学講師 工学部建築学科 工博 (正会員)

*2 中部大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

後に打撃を行わず、自重で崩れた試料の拡がり直径 (M_0) を測定する試験である。また、J14ロート流下試験は、Jロート (JSCE-F541) を流用して、吐出口直径が14mmとなるように切断したロートを用いた流下試験である。これらの測定値からレオロジー定数を推定する略算式を式(1)から式(3)に示す。なお、試験方法と式の詳細については前報¹⁾を参照されたい。

$$\tau_y = \frac{4.26 \times 10^6}{M_0^2} \quad \dots (1)$$

$$\beta = 1 - 5.14 \times 10^{-3} \times \tau_y + 7.38 \times 10^{-11} \times \tau_y^4 \quad \dots (2)$$

$$\eta = 0.120 \times \beta \times t_{14} \quad \dots (3)$$

ここで、 τ_y : 降伏値 (Pa) , M_0 : 0打モルタルフロー値 (mm) , β : 栓流に関するパラメータ , t_{14} : J14ロート流下時間 (秒) , η : 塑性粘度 (Pa · s) .

2.3 使用材料と調合

実験-1では、普通ポルトランドセメントおよび木曾川産川砂 (密度2,560kg/m³) を用いた。高性能AE減水剤には、ポリカルボン酸系の標準形 (シリーズ名にSを記す) と遅延形 (シリーズ名にRを記す) の2銘柄を用いた。化学混和剤を用いない調合はシリーズ名にPを記した。実験で用いた試料の調合を表-1に示す。水セメント比は50%と30%の2水準とし、たとえばMP50のように、M+英字1文字+水セメント比でシリーズ名を表すこととした。MP50およびMS30では、それぞれ練上り時

表-1 モルタルの調合

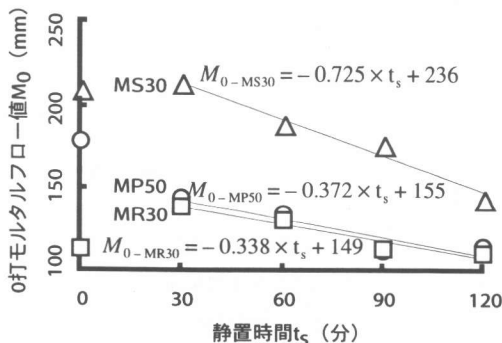
Series	W/C(%)	S/C	Ad (%)
MP50	50	1.7	-
MS30	30	1.3	0.66
MR30	30	1.3	0.66

註) W/C: 水セメント比, S/C: 砂セメント比 (重量), Ad: 高性能AE減水剤の添加量.

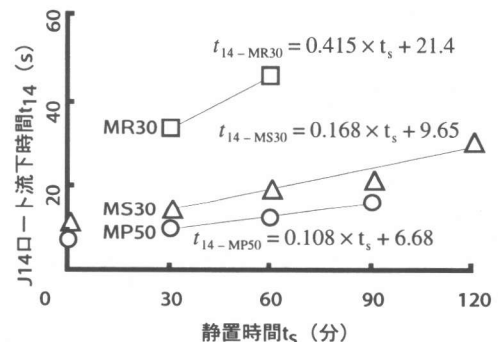
の目標 M_0 を180mmおよび210mmとし、それぞれ砂セメント比 (S/C) および高性能AE減水剤の添加量で管理幅 ± 5 mmとなるように調整した。MR30の場合は、MS30と同量の高性能AE減水剤の添加量で実験を行い、練上り直後の0打フロー値は管理しなかった。

2.4 モルタルの経時変化 (通常法)

試験直前に切り返しを行う通常の試験方法 (通常法) で測定したフレッシュモルタルの経時変化を図-2に示す。MP50 (プレーン) の0打モルタルフロー値は、練上り直後から単調にフローダウンしているが、高性能AE減水剤を用いた2調合は練上り30分後にやや M_0 が大きくなってから、その後小さくなる様子が観察された。いずれも30分以後は静置時間に対して直線的に変化していることから、図中には、30分から120分までのデータを最小2乗法で直線近似した結果を併記した。一方、ロート流下時間は、全体に時間経過とともに増加する傾向がみられるものの、MR30 (遅延形) の



(a) 0打モルタルフロー値



(b) J14ロート流下時間

図-2 フレッシュモルタルの経時変化 (通常法)

場合、練上り直後および90分以後はロート内で閉塞してしまい、測定ができなかった。図中には、30分以後データの得られた範囲で直線近似した結果を併記した。

2.5 モルタルの経時変化（静置法）

試験容器に試料を充填させた後で静置時間 (t'_s) を設け、流動試験を行う静置法によるフレッシュ試験結果を図-3に示す。図中には、5分以後のデータを最小2乗法で直線近似した結果を併記した。ロート流下時間に注目すると、MP50（プレーン）やMR30はほとんど流下時間には変化がみられず、また、図-2に示した通常法の結果とは対称的に、MS30に比べてMR30の方が流下時間が短くなる結果となった。これは、高性能AE減水剤の種類によって養生条件に対する分散性能の効果の発揮されかたが違うため、MS30とMR30の流下時間に差ができたものと考えられる。

2.6 モルタルのレオロジー性質の変化

静置条件の違いがモルタルのレオロジー性質に及ぼす影響について検討した結果を図-4に示す。前述までの図中で示した近似式を用いて、練上りからの時間が35~45分（容器内静置時間でいうところの5~15分）のフレッシュ性質を推定し、それを式(1)から式(3)へ代入してレオロジー性質に変換した。練上りからの静置時間が同一で静置条件が違うという組合せを図中にプロットした。図中の記号には、練上りからの時間（分）を付した。ただし、0打モルタルフロー値が128mm以下になると、理論上はロート内で閉塞が生じ計算できなくなることから、降伏値が大きい場合は塑性粘度を推定していない。

MP50（プレーン）やMS30（標準形）は、通常法ではあまり降伏値が変化しなくても、容器内に静置すると降伏値が増加していくことがわかる。一方、MR30（遅延形）は、容器内で静置しても

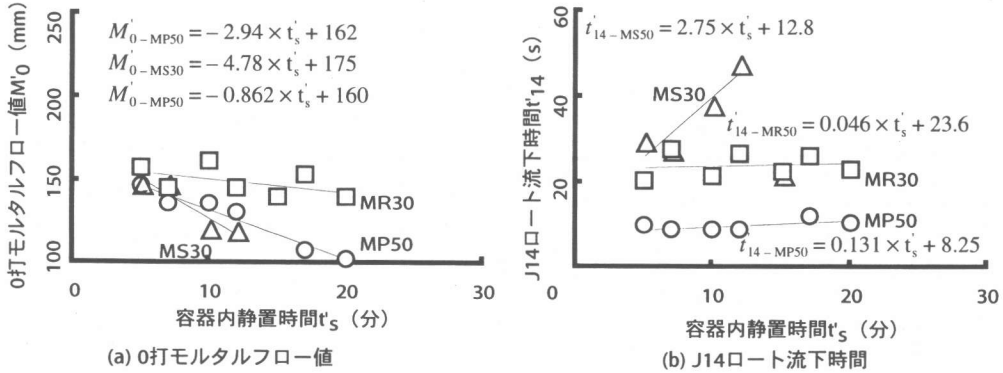


図-3 フレッシュモルタルの経時変化（静置法）

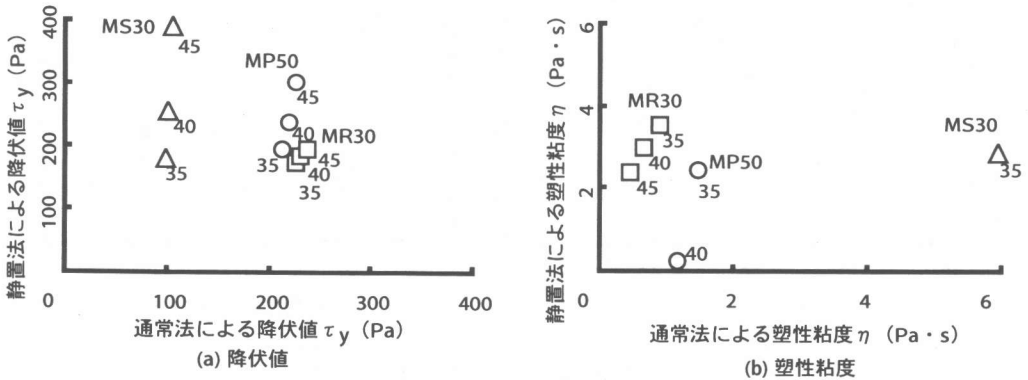


図-4 静置条件の違いがモルタルのレオロジー性質に及ぼす影響

ほとんど降伏値には変化がみられない。

塑性粘度の変化に注目すると、MP50やMR30の場合は、静置条件によらず塑性粘度が減少しており、その程度は、通常法よりも静置法の方が大きく変化していることが分かる。

このように、材料や養生条件によっては、みかけの塑性粘度が大きく変化するというチクソトロピー性が発現する場合があることが分かった。

3. コンクリートの容器内静置実験（実験-2）

3.1 実験の概要

実験-2では、前述のモルタルの実験に引き続き、ポンプ配管内でのコンクリートの物性の変化を模擬するために、2種類の養生下でのフレッシュコンクリートのレオロジー的な変化を検討した。実験手順としては、ほぼ前述のモルタルの実験と同じである。

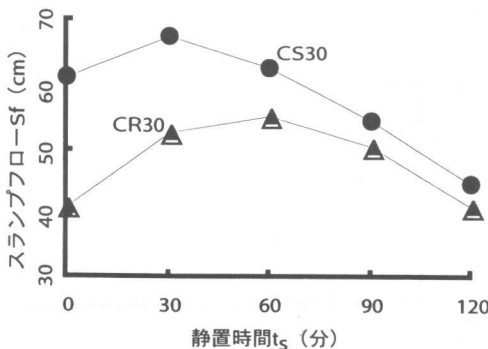
3.2 レオロジー性質の推定

本研究では、コンクリートのレオロジー定数を推定する試験方法として、スランプフロー試験（JASS 5 T-503）および逆さスランプ流下試験²⁾を用いた。逆さスランプ流下試験とは、スランプコ

表-2 コンクリートの標準調合 (kg/m³)

W/C	s/a	Air	W	C	S	G	Ad
30%	50%	2%	170	567	807	816	1.2 %C

註) W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, Ad:高性能AE減水剤の添加量。



(a) スランプフロー値

ーンを逆さ設置して試料を充填した後、静かに引き上げた時に流下する時間を測定する試験である。これらの測定値からレオロジー定数を推定する略算式を式(4)から式(6)に示す。なお、試験方法と式の詳細については前報²⁾を参照されたい。

$$\tau_y = \frac{911 \times 10^3}{S_f^2} \quad \dots (4)$$

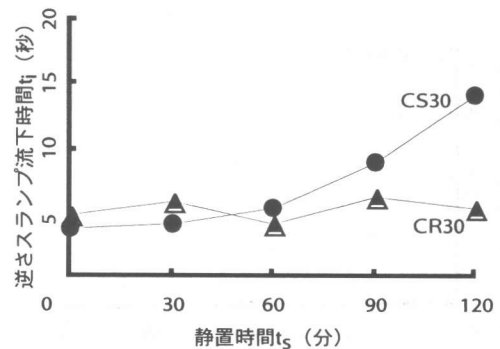
$$\beta = 1 - 1.54 \times 10^{-3} \times \tau_y + 5.96 \times 10^{-13} \times \tau_y^4 \quad \dots (5)$$

$$\eta = 22.1 \times \beta \times t_i \quad \dots (6)$$

ここで、 τ_y : 降伏値 (Pa) , S_f : スランプフロー値 (cm) , β : 栓流に関するパラメータ, t_i : 逆さスランプ流下時間 (秒) , η : 塑性粘度 (Pa · s) .

3.3 使用材料と調合

実験-2では、実験-1で使った材料に加え、木曾川産砂利（密度2,600kg/m³）を用いた。標準調合表を表-2に示す。水セメント比は30%のみとし、実験-1で用いた2種類の高性能AE減水剤を用いた。調合名は、たとえばCS30のように、C+英字1文字+水セメント比でシリーズ名を表すこととした。CS30は、練上がり時の目標スランプフローを60cmとし、高性能AE減水剤の添加量で管理幅±1.5cmとなるように調整した。CR30の場合は、CS30と同量の高性能AE減水剤の添加量で実験を行い、練上がり直後のスランプフロー値は管理しなかった。



(b) 逆さスランプ流下時間

図-5 フレッシュコンクリートの経時変化 (通常法)

3.4 コンクリートの経時変化（通常法）

試験直前に切り返しを行う通常の試験方法（通常法）で測定したフレッシュコンクリートの経時変化を図-5に示す。スランブフロー値の経時変化に注目すると、CS30（標準形）の場合は、静置時間30分後に最大値となりその後ゆるやかにフローダウンしている。逆さスランブ流下時間は、CS30の場合は緩やかに増加傾向にあるものの、CR30（遅延形）の場合は、静置時間による大きな変化は見られなかった。

3.5 コンクリートの経時変化（静置法）

静置法によるフレッシュ試験結果を図-6に示す。スランブフロー試験では、いずれの試料も10分目のデータを除けばゆるやかな上に凸の曲線を示している。逆さスランブ流下試験では、CR30（遅延形）が静置時間にかかわらず流下時間があまり変化しなかったのに対し、CS30（標準形）は、静置時間10分過ぎから急激に流下時間が増加する結果となった。

3.6 コンクリートのレオロジー性質の変化

静置条件の違いがコンクリートのレオロジー性質に及ぼす影響について検討した結果を図-7に示す。通常法で測定した30～60分のフレッシュ試験結果を直線補完して、練上りからの時間が35～55分のレオロジー性質を推定した。練上りからの静置時間が同一で静置条件が違うという組合せを図中にプロットした。モルタルの場合と同様に、通常法ではあまり降伏値が変化しなくても、容器内に静置すると降伏値が大きく変動しており、CR30でも、降伏値に変化がみられた。塑性粘度の変化に注目すると、CS30の場合は静置することによって大きく変動するものの、それにくらべるとCR30は静置してもそれほど変化はしなかった。

4. コンクリートの再攪拌

4.1 実験の概要

実験では、ポンプ配管内でせん断力を受けるコンクリートの品質変化を把握することを最終目的

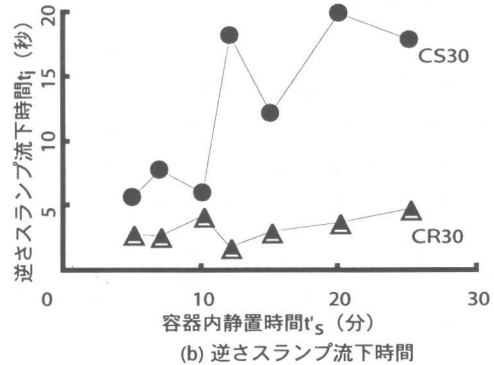
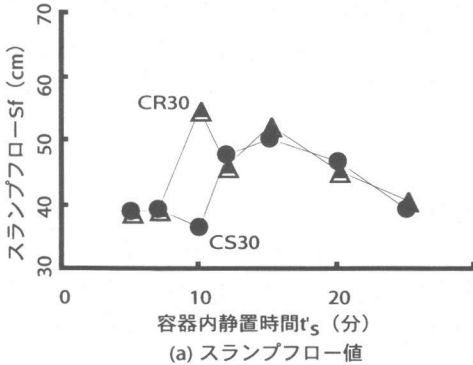
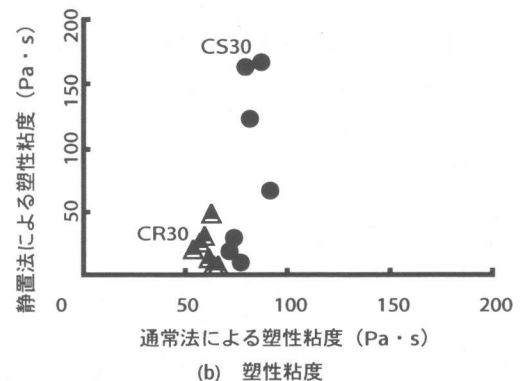
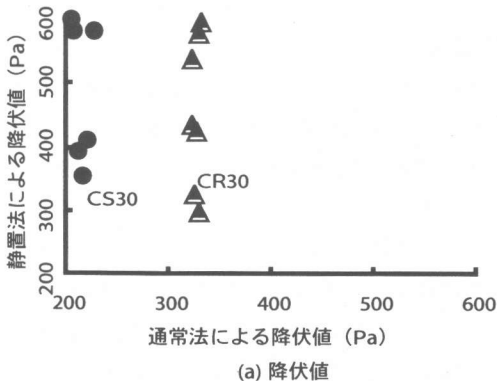
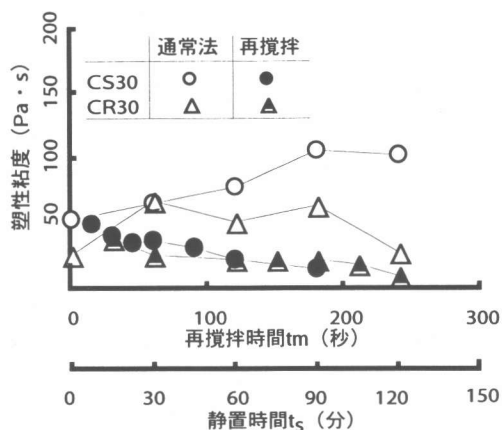
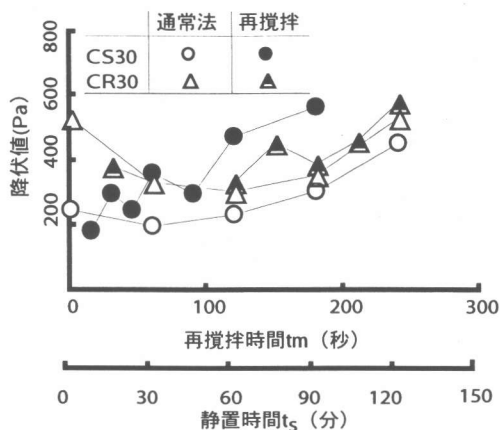


図-6 フレッシュコンクリートの経時変化（静置法）





(a) 降伏値

(b) 塑性粘度

図-8 再搅拌がコンクリートのレオロジー性質に及ぼす影響

として、ここでは、一旦練り上げられたコンクリートを再度ミキサを用いて搅拌した時の、レオロジー的な変化を検討した。実験手順としては、前述のコンクリートの実験で30分後に容器に充填して静置するかわりに、ミキサに投入して搅拌した。使用したミキサは1軸強制練りミキサ（容量50リットル）である。使用したコンクリートは、前述のコンクリートと同じである。

4.2 再搅拌時間とレオロジー性質の関係

図-8に通常法および再搅拌したコンクリートのレオロジー性質の経時変化を示す。降伏値は、いずれの条件でも時間の経過とともに増加するものの、一方、塑性粘度は、通常法では増加するが再搅拌によって減少していることが分かる。ポンプ圧送でも再搅拌でも大きなせん断力が加えられていることから、このせん断力がコンクリートの塑性粘度を低下させたのではないかと推測できる。このように、ポンプ圧送後にコンクリートの粘性が低下する傾向を再搅拌という手法で室内実験的に模擬できる可能性があることが分かった。

5. まとめ

本研究では、ポンプ圧送によるフレッシュコンクリートの品質の変化を把握することを最終目的として、閉空間に充填されたときのレオロジー的性質の変化をモルタルおよびコンクリートを用い

て検討した。また、ポンプ圧送時に生じるせん断力をミキサを用いてシミュレートし、せん断力がフレッシュ性状に及ぼす影響について検討した。その結果、試験容器内で静置させた場合、降伏値は増大し、チクソトロピ的な性状を示すことが分かった。また、コンクリートをミキサで再搅拌した場合、降伏値は増加し塑性粘度は減少する傾向を示し、ポンプ圧送によるスランプロスのような性状を示した。

謝辞

本研究は、阿部秀和君、福岡克勝君、木村文教の助力を得た。また、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)およびハイテクリサーチセンター整備事業の援助によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 渡辺・小野・谷川：フレッシュモルタルのレオロジー性質に及ぼす再搅拌の影響，コンクリート工学年次論文梗概集，Vol.22-2，pp.427-432，2000.7.
- 2) 渡辺・後藤・黒羽：フレッシュコンクリートの分離抵抗性・流動性の測定方法に関する一考察，フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集，pp.37-42，1996.4.