

分割練混ぜがモルタルの流動特性に及ぼす影響

コンクリート研究室 小池公紀
指導教官 丸山久一
下村 匠

要旨: 分割練混ぜにおいて 1 次水量の変化がモルタルの流動特性に及ぼす影響について検討を行った。1 次水セメント比を変化させ、練上がり直後のフロー値と時間経過に伴うフロー値の変化を測定した。その結果、普通コンクリートを想定したモルタルの場合、フロー値は 1 次水の量、つまり練混ぜトルクの影響を受けないことが明らかとなった。これに対し、自己充填コンクリートを想定したモルタルでは、練混ぜトルクが十分大きくなる 1 次水セメント比 24% のときと、逆に練混ぜトルクが小さくなる 1 次水セメント比 3% の時にフロー値が増大する結果を得た。

1. はじめに

分割練混ぜに関する最初の実用的な研究は伊東らの開発した S.E.C 工法である¹⁾。S.E.C 工法で製造されたコンクリートは材料分離に対する抵抗性が大きく均質なコンクリートを製造できると報告している。田澤ら²⁾は、ブリーディング率が最小となる最適な 1 次水量を投入することにより一括練混ぜに比べ、セメントペーストの降伏値は上昇し、塑性粘度は低下すること、および、ブリーディングが最小となる 1 次水セメント比では、練混ぜトルクが最大になることを明らかにしている。また、菅俣ら³⁾は、自己充填コンクリートを対象に、1 次水量一定のもとで高性能 AE 減水剤添加前の硬練り状態での練混ぜ時間を長くすると、流動性が低下することを明らかにしている。このように、分割練混ぜに関する研究は、最適水セメント比における特性に着目したものが多く、1 次水量の変化と流動特性との関係について十分に検討されていないのが現状である。

そこで本研究は、流動特性に対する分割練混ぜの効果を明確にすることを目的として、使用材料、配合を変化させた各種モルタルの流動特性に及ぼす 1 次水量の影響を検討したものである。

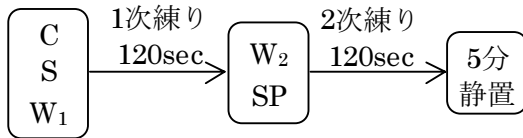
表-1 モルタルの使用材料

材料 (記号)	種類	特性値
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm ³ , ブレン比表面積 3500cm ² /g
細骨材 (S)	川砂	表乾密度:2.64g/cm ³ 吸水率:1.72%, 粗粒率:2.42
	分類	主成分
AE 減水剤 (A)	リグニン スルホン 酸系	リグニンスルホン酸化合物とポリオール の複合体
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカル ボン酸系	ポリカルボン酸エーテル系と架橋 ポリマーの複合体

2. 実験概要

表-1 に実験に使用した材料とその特性値を示す。モルタルの練混ぜ方法を図-1 に示す。練混ぜには JIS R 5201 に定めるミキサを用いた。練上がり後、流動性を安定させるため 5 分間静置した後、フロー試験を行った。練混ぜ量は 1 バッチ 1.5 リットルとした。比較とした一括練混ぜは全材料投入後 240 秒練り混ぜを行った。時間経過に伴う流動特性の変化を調べるため、練上がり後 35 分後と 65 分後にフロー試験を行った。フロー試験の直前には 10 秒間練直

しを行った。細骨材表面水率は約 1%となるよう管理した。試験を行ったモルタルの種類を表-2 に示す。普通コンクリートを想定したモルタル 2 種類, 自己充填コンクリートを想定したモルタル 1 種類の計 3 種類とした。



W₁ : 1次水, W₂ : 2次水
(注)ミキサは低速回転

図-1 モルタルの練混ぜ方法

表-2 モルタルの種類

モルタルの種類	細骨材容積比 (%)	W/C (%)	混和剤添加率 (%)	減水率 (%)
プレーンモルタル	48	45	—	—
AE 減水モルタル	53	45	0.2	10
自己充填モルタル	45	30	1.2	—

3. 1次水量とブリーディング率の関係

既往の研究²⁾より, ブリーディング率が最小となる1次水量のとき練混ぜトルクが最大となることが明らかとなっている。プレーンモルタルを用いてブリーディング試験を行い間接的にミキサの練混ぜトルクが大きくなる1次水量を確認した。1次水セメント比を3~45%の範囲内で変化させてブリーディング試験を行った。その結果を図-2 に示す。モルタルのブリーディング率の測定には直径 100×200mm のモールド缶を用いた。ブリーディング率は, 1次水セメント比 24%付近で最も小さくなった

以上のことより, 本研究で使用するモルタルは, ブリーディング率が最も小さくなった1次水セメント比 24%付近でミキサの練混ぜトルクが十分大きくなっていると推測できる。

4. モルタルの流動特性に及ぼす1次水量の影響

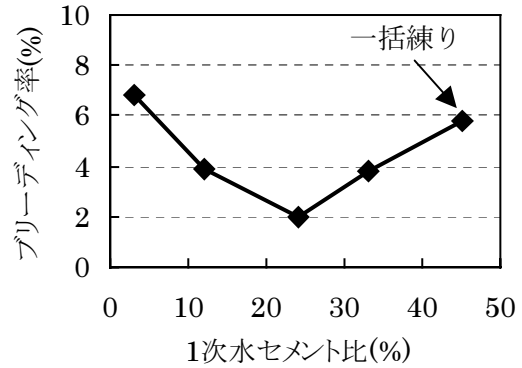


図-2 1次水量とブリーディング率の関係

4.1 1次水量と初期流動特性の関係

1次水セメント比(以下, W₁/C と略す)を3~45%の範囲内で変化させ, 練上がり5分後にフロー試験を行った結果を図-3 に示す。プレーンモルタル, AE 減水モルタルは1次水量が変化しても15打フローの変化量は小さいものとなった。自己充填モルタルは W₁/C が3%で0打フローが最も大きくなっている。その後, 1次水量が増加するに伴い0打フローは減少しているが, W₁/C が24%で再び0打フローが増加している。

4.2 1次水量と流動特性の経時変化の関係

W₁/C を3~45%の範囲内で変化させ, プレーンモルタルと自己充填モルタルで練上がり後5, 35および65分後にフロー値を測定した結果を図-4 に示す。プレーンモルタルは時間の経過に伴い15打フローが若干減少しているものの, 1次水量の違いによる相違は見られない。自己充填モルタルは, 一括練りと W₁/C が12%のときは時間の経過に伴う0打フローの減少は見られない。しかし, W₁/C が3%と24%の場合には時間の経過に伴い0打フローが減少している。特に, W₁/C が3%の場合に0打フローの減少が大きくなっている。自己充填モルタルでは初期のフロー値が大きくなる1次水量のときにフロー値の経時変化も大きくなるという結果が得られた。

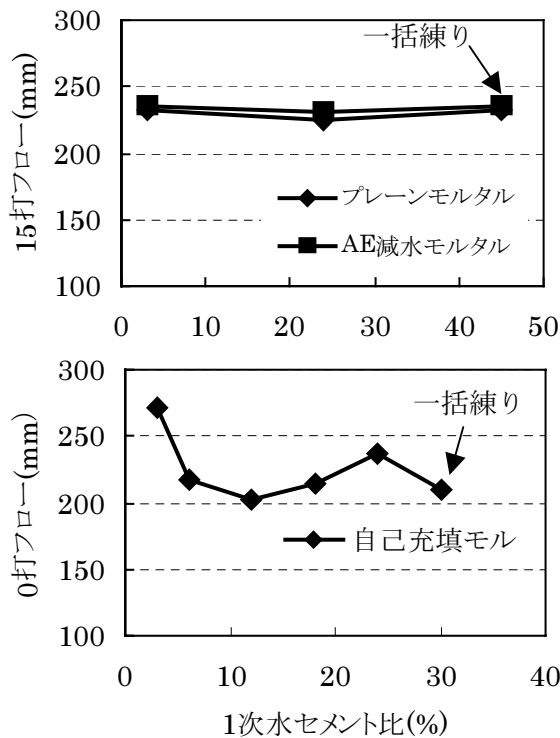


図-3 1次水量と初期流動特性の関係

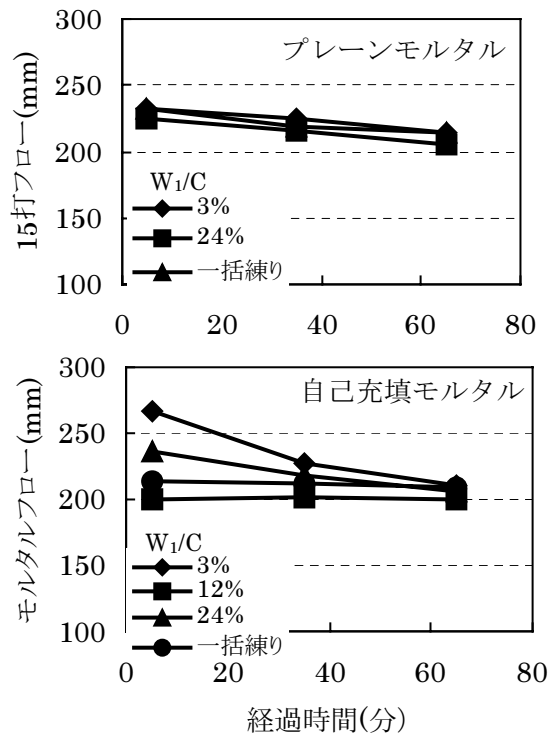


図-4 流動特性の経時変化

5. 水和反応と練混ぜトルクが流動性に及ぼす影響

フレッシュモルタルの初期流動性にはセメントの水和反応、粒子の凝集・分散状態および高性能 AE 減水剤(以下、SP と略す)の分散作用の 3 つが互いに影響を及ぼしていると考えられる。本節ではセメントの水和反応と練混ぜトルクによる粒子の凝集状態が SP の分散作用に及ぼす影響を検討する。

5.1 水和反応の影響

セメントの水和反応の影響を取り除くため石灰石微粉末を用いて 1 次水量とモルタルの流動特性との関係を調べた。使用した石灰石微粉末は密度 2.70g/cm^3 、ブレン比表面積 $4500\text{cm}^2/\text{g}$ 程度のものである。水粉体質量比はセメントと同一の 30%とし、一括練りで調製した場合に 0 打フロー値 220mm 程度となるように SP 添加率を調整し $\text{SP}=0.43\text{wt}\%$ とした。セメントと石灰石微粉末ではブレン比表面積が異なるため、石灰石モルタルで練混ぜトルクが大きくなる 1

次水粉体比はセメントの場合と異なると考えられる。しかし、田澤らは²⁾ブレン比表面積と最大ブリーディング率との関係を調べており、ブレン比表面積が $3000\sim 7000\text{cm}^2/\text{g}$ の間では、ブリーディング率が最大となる 1 次水量はセメント質量の 20~30%であることを示している。したがって、本研究で使用している石灰石微粉末の場合においても 1 次水粉体比 24%で練混ぜトルクが十分大きくなっていると推測できる。1 次水量と練上がり 5 分後のフロー値との関係を図-5 に示す。図には前節で求めた自己充填モルタルの結果を破線で示してある。両者を比較すると、1 次水量の変化に対して石灰石モルタルの 0 打フロー値の変化量は小さなものであり、練混ぜトルクが大きくなっている 1 次水粉体比 24%においてもフロー値の増加は認められなかった。したがって、セメントを用いた自己充填モルタルで生じたフロー値の増加はセメントの水和反応が影響していると推測できる。

5.2 練混ぜトルクの影響

次に粒子の凝集・分散状態に影響を及ぼす練混ぜトルクの影響について検討を行った。1次練混ぜ時間を30秒～240秒の範囲で変化させてモルタルの0打フローを測定した。SP投入後の2次練りの時間は120秒で一定とした。比較のために行った一括練りの練混ぜ時間は、分割練混ぜの合計時間と同一となるように設定した。石灰石微粉末を用いたモルタルにおける1次練混ぜ時間と0打フローとの関係を図-6に示す。練混ぜトルクの大きな1次水粉体比24%の配合だけが1次練混ぜ時間の延長とともに流動性を失っていることが見て取れる。接水直後に凝集した粒子が強いせん断力によって一旦分散し、その後練混ぜ中に再び凝集が生じたものと考えられる。その後、SPが添加されても再凝集した粒子群には有効に作用せず、結果としてフロー値が小さくなったと考えられる。これに対して、1次水粉体比が3%や12%の配合では、練混ぜトルクが接水直後の凝集体を分散するには不十分で、練り混ぜ中も初期の凝集構造をある程度保持していたと考えられる。その後、SPが添加され、初期の凝集構造の上にSPが作用したものと考えられる。したがって、接水初期の構造と一旦分散し、再凝集した構造ではその後に発揮されるSPの分散作用の程度が異なってくると推測できる。

次にセメントを用いた自己充填モルタルにおける1次練混ぜ時間と練上がり5分後に測定した0打フローとの関係を図-7に示す。粒子の分散・再凝集に立脚した上述の考察に従うと、1次水セメント比が12%では1次練混ぜ中のせん断力が接水初期の凝集体を十分分散させるには不十分で、練り混ぜ中の分散・再凝集の度合いが小さくなり、その後添加されるSPは凝集体の表面で有効に作用し、結果として流動性は低下しないと予測できる。しかしながら、図-7に示す実験結果では、 W_1/C が12%の場合も練混ぜ時間の増加に伴い0打フローが低下している。これは1次練混ぜ中に生じたセメントの水和反

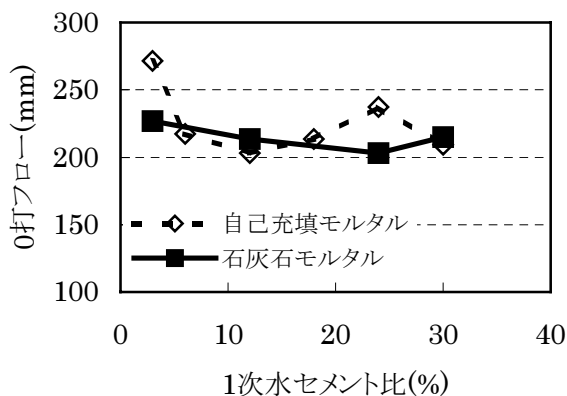


図-5 1次水量と初期流動特性の関係

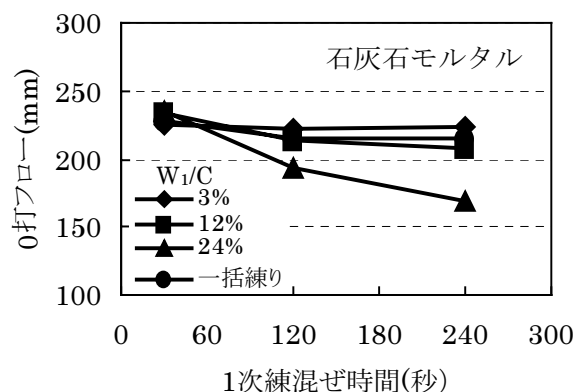


図-6 練混ぜ時間と初期流動特性の関係

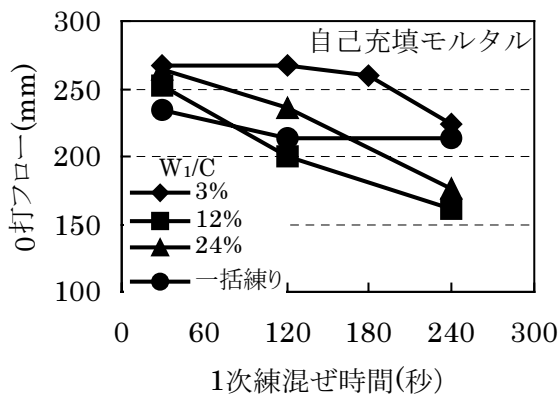






図-7 練混ぜ時間と初期流動特性の関係

応の影響を考慮する必要があることを示唆している。 W_1/C が12%の場合も練り混ぜ中にある程度のトルクが発生し、せん断力により凝集体の分散と再凝集が生じていると考えられる。ただし、分散・再凝集の程度は W_1/C が24%の場合と比較して小さいと考えられる。この練混ぜ中の分散・再凝集と同時にセメントの水和反応


が進行し、再凝集の構造と水和反応の結果がSPの分散作用に影響を与え、0打フローが低下したものと考えられる。しかしながら、このような仮説にしたがって W_1/C 24%の配合の挙動を説明すると、 W_1/C 12%よりも大きなせん断力を受けて再凝集しており、これにセメントの水和反応の影響が加わると、 W_1/C 12%の配合と比較して0打フローの低下が大きくなると考えられる。しかしながら、-3 や -7 に示すように W_1/C 24%で練混ぜたものは、12%の配合と比較して0打フローが大きくなっている。この矛盾点を解消するために以下に2つの仮説を提案する。


(1) 1次練混ぜ中に生じる分散・再凝集の結果はSPの粒子分散作用にマイナスの効果を発揮する。 W_1/C が12%と24%では、1次練混ぜ中に生じる分散・再凝集の程度は24%の方が大きく、結果として0打フローはより小さくなる。

(2) 1次練混ぜ中に生じる水和反応がSPの粒子分散作用に及ぼす影響は、 W_1/C が12%と24%の場合では異なり、 W_1/C を24%とした時に生じる水和反応の結果はSPの分散作用にプラスの効果を発揮するが、12%の結果はマイナスの効果を及ぼす。

以上の仮説に従うと -3、-7の挙動は以下のようなメカニズムによるものと説明できる。 W_1/C が12%の場合、1次練混ぜ中のせん断力により分散と再凝集が生じ、同時に進行した水和反応が後に添加されるSPの粒子分散作用にマイナス効果を及ぼし、結果として0打フローが小さくなった。また、 W_1/C が24%の場合、1次練混ぜ中に進行した水和反応が結果として後に添加されるSPの粒子分散作用を促進させ、強いせん断力で生じた再凝集体の表面で十分な分散作用を得ることができ、結果として12%の配合よりも0打フローが大きくなったと考えられる。また、1次練混ぜ時間を延長した際に生じる0打フロー低下の主要な原因は、 W_1/C が12%の場合は水和反応の継続であり、24%の場合は分散・再凝集の進行であると考えられる。

6. 1次水セメント比と高性能AE減水剤の分散作用

前節の仮説を検証するために、1次水セメント比と高性能AE減水剤の粒子分散作用との関係について検討を行った。SPの分散作用は山田の提案するパラメータ⁶⁾を参考にして、間接的に評価することとした。 W_1/C ごとにSP添加率と練上がり5分後に測定した0打フローとの関係を -8 に示す。1次練混ぜ時間は120秒とした。SP添加率と0打フローとの関係はほぼ直線であり一次関数で近似可能であると考えられる。この直線の傾きはSP添加率に対するフロー値の増加量を表し、この傾きが大きいほどSPの粒子分散作用が有効に機能していると判断できる。また、横軸の切辺はSPの効果が発揮されるために必要な最小限の添加率を表し、この横軸の切辺が小さいほど少量の添加率でも流動性を得ることができ、SPの分散作用が有効に機能していると判断できる。

このような2つのパラメータに基づいて -8を評価すると、 W_1/C が3%の場合、直線の傾きが大きく、さらに横軸の切辺も他と比べて小さくなっている。したがって、練上がり直後にセメントの初期水および液相中のイオン濃度の影響が抑制され、SPの分散作用が十分に発揮される状態にあると推測できる。練上がり直後にセメント粒子表面に吸着し流動性に寄与した混和剤分子が多く、相対的に液相中に残存していた混和剤分子が少なくなったものと考えられる。したがって、初期の流動性は高いが、時間の経過に伴い水和反応が進行すると、表面積の増加に見合う分の吸着がなされず、流動性が低下したものと考えられる。 W_1/C 12%と24%を比較すると、横軸の切辺は同程度であるが、直線の傾きに明らかな差が認められる。 W_1/C を24%とした場合、12%の配合と比較して、液相中のイオン濃度がSPの分散作用に及ぼす影響をより抑制している状態にあると考えられる。これが W_1/C を24%とした時に得られるSPに対するプラス効果であると考えられる。

次に1次練混ぜ時間を延長した場合の影響について検討を行う。図-9に1次練混ぜ時間を120秒から180秒に延長した場合の結果を示す。W₁/Cを24%とした場合、練混ぜ時間延長に伴い直線の傾きが若干小さくなっている。これに対して、W₁/Cを12%とした場合、直線の傾きが若干大きくなるが横軸の切辺の増加が顕著に表れている。したがって、W₁/Cを24%とした場合、1次練混ぜ時間を延長すると、液相中のイオン濃度の影響によってSPの分散作用が低下すると考えられる。W₁/Cを12%とした場合は、セメント粒子表面の状態変化がSPの分散作用を低下させていると推測される。

7. まとめ

分割練混ぜがモルタルの流動特性に及ぼす影響に関して、1次水量の変化に着目して検討を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 1次水量が極少量の場合、セメントの水和反応が局所的、偏在的に生じ、その結果初期の水和活性が抑制され、高性能AE減水剤の作用が向上すると考えられる。
- (2) 1次水セメント比を最適水セメント比に近い24%とした場合、その半分の12%の配合と比較して液相中のイオン濃度がSPの分散作用に及ぼす影響を抑制でき、結果として0打フローが大きくなると考えられる。
- (3) 1次練混ぜ時間を延長した場合、24%は液相中のイオン濃度の影響が大きくなり、流動性が低下するが、12%の場合はセメント粒子表面の状態変化に起因して流動性が低下すると考えられる。

参考文献

- 1) 伊東靖朗, 辻正哲, 加賀秀治, 山本康弘 : S.E.C コンクリートの特性と展望, セメント・コンクリート, No.40, pp.20-29, 1981.4
- 2) 田澤栄一, 笠井哲郎 : フレッシュセメント

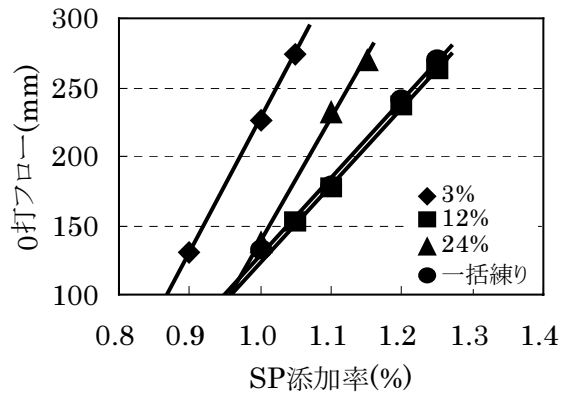


図-8 0打フローとSP添加率の関係

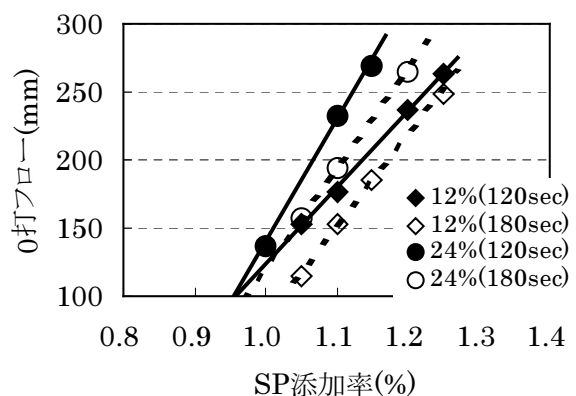


図-9 0打フローとSP添加率の関係

ペーストのダブルミキシング効果, 土木学会論文集, 第396号/V-9, pp.135-142, 1988

- 3) 田澤栄一, 笠井哲郎 : ダブルミキシング効果とその機構について, フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, pp.97-102, 1989.4
- 4) 菅俣匠, 日比野誠, 大内雅博, 岡村甫 : 高性能AE減水剤の作用効果に及ぼす練混ぜ方法の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.325-330, 1998
- 5) 吉岡一弘, 田澤栄一 : セメント構成鉱物の凝集モデルに基づくダブルミキシング効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1-6, 1999
- 6) 山田一夫 : セメントの初期水和反応と液相の組成変化を考慮したポリエーテル系セメント分散剤の作用機構, 東京工業大学学位論文, 2000.3