

# 論文 外力によるセメントの凝集・分散と高性能 AE 減水剤の吸着

中山 知大\*1・大内 雅博\*2

**要旨：**練混ぜ方法や練混ぜ時間の違いが自己充填モルタルの流動性に与える影響を、セメント粒子の凝集分散状態と自由水量の変化によるものと仮定し、高性能 AE 減水剤の吸着量の変化に着目して明らかにした。練混ぜエネルギーの増加に伴い、高性能 AE 減水剤の吸着量と自由水量が増加した。しかし、高性能 AE 減水剤の吸着量が増加してもセメント粒子の分散効果は一定となった。一方、高性能 AE 減水剤の添加量が小さい場合には、練混ぜエネルギーが大きくなるとセメント粒子の分散効果が小さくなった。

**キーワード：**自己充填性, 流動性変化, 練混ぜ, 高性能 AE 減水剤, 凝集, 分散, 自由水

## 1. はじめに

### 1.1 本研究の目的

近年の構造物の高層化や複雑化に伴い、締め固め作業を必要とせず重力の作用のみで型枠内に充填する自己充填コンクリートの使用によって施工性の大幅な向上が見込まれる。

しかし、同じ配合条件であっても、自己充填コンクリートを練混ぜるミキサの種類や練混ぜ方法、そして練混ぜる時間によって、練上り時の自己充填コンクリートの流動性とその後の経時変化が大きく異なることが明らかになっているが、そのメカニズムは未だ解明されていない部分がある。

本研究の目的は、自己充填コンクリートのモルタル相（以下、自己充填モルタルと呼称）の練混ぜ方法や練混ぜ時間が流動性に及ぼすメカニズムを、フレッシュモルタルの自由水量やセメント粒子の凝集分散状態の変化として、高性能AE減水剤の吸着量の変化に着目して明らかにすることである。

### 1.2 既往の研究

大内は、相対フロー面積比  $G_m$  および相対ロート速度比  $R_m$  から、水と高性能 AE 減水剤の分散効果をそれぞれ独立して定量化する方法を提案している<sup>1),2)</sup>。モルタルの変形性および粘性の測定には図-1 に示す試験器を使用した。フローコーンにモルタルを詰め、振動を与えずフローの広がりを測定した。このモルタルフローにより式(1)より求めた相対フロー面積比 ( $G_m$ ) を変形性の指標とした。

$$G_m = (d_1^2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (1)$$

ここで、 $d_1$  : モルタルフローの直径 (mm)

$d_0$  : フローコーンの直径 (mm)

一方、図-1 に示す寸法の V ロートにモルタルを投入し、流下時間を測定した。このロート流下時間による相対ロート速度比 ( $R_m$ ) を粘性の指標とし、式(2)より求めた。

$$R_m = 10/t \quad (2)$$

ここで、 $t$  : ロート流下時間 (秒)

同一練混ぜ方法及び練混ぜ時間の場合、水セメント比一定のもとで高性能AE減水剤添加量を変化させた場合、図-2から求められる $G_m$ と $R_m$ の関係は式(3)で表される。

$$R_m = A \cdot G_m^{0.4} \quad (3)$$

ここで、 $A$  : 水セメント比により決まる係数

また、同一練混ぜ方法及び練混ぜ時間の場合、高性能AE減水剤添加量一定のもとで水セメント比を変化させた場合、図-2から求められる $G_m$ と $R_m$ の関係は式(4)で表され、その傾きの逆数式(5)は高性能AE減水剤添加量の大きさに比例する。

$$R_m = C \cdot G_m \quad (4)$$

$$1/C = G_m/R_m \quad (5)$$

ここで、 $C$  : 高性能AE減水剤添加量により決まる係数以上のように、自由水の効果を $R_m/G_m^{0.4}$ を用いて表し、高性能AE減水剤の分散効果を $G_m/R_m$ を用いて表す。

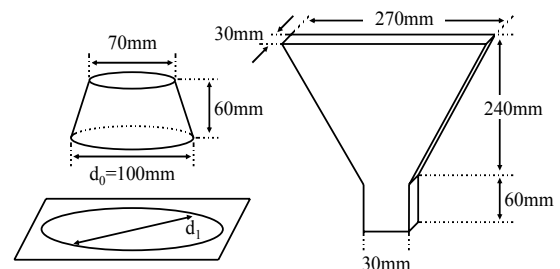


図-1 モルタルフローコーンおよびロート

\*1 高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻社会システム工学コース (正会員)

\*2 高知工科大学准教授 工学部社会システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

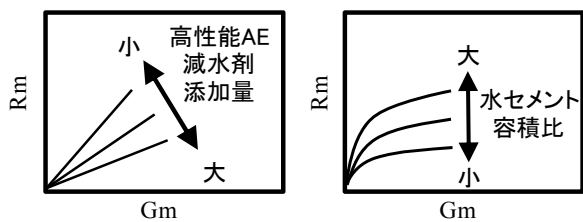


図-2 水セメント容積比と高性能AE減水剤の添加量が流動性に及ぼす影響

## 2. 予備実験

### 2.1 外力による自己充填モルタルの流動性変化の観察

本研究では、自己充填コンクリート用の適切な配合の自己充填モルタルを用いた。まず、練混ぜ方法や練混ぜ時間を変えることによって、自己充填モルタルに作用する外力を変化させ、練上り時の自己充填モルタルの流動性を観察した。

試験に際し、自己充填モルタルの温度変化が流動性へ与える影響を除去するため、各材料を室温 20℃の恒温室内に予め 24 時間以上静置した。また、試験は外気温による自己充填モルタルの流動性への影響を除外するため、同じく室温 20℃の恒温室内で行った。

#### (1) 使用材料および配合

使用した材料の物性を表-1 に示す。セメントは低熱ポルトランドセメントを、細骨材は石灰石砕砂を、混和剤はポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

自己充填モルタルの配合を表-2 に示す。高性能 AE 減水剤の添加量は「(2)モルタルの練混ぜ方法」の図-3 に示す⑤分割練混ぜ (180 秒) での練上がり直後のモルタルフローを基準とし、モルタルフローが 280±10 mm になるように調節した。

表-1 使用材料

C	低熱ポルトランドセメント 密度 3.24 g/cm <sup>3</sup>
S	石灰石砕砂 粗粒率 2.92 密度 2.68 g/cm <sup>3</sup>
SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
W	上水道水

表-2 自己充填モルタルの配合

W/C (%)	s/m (%)	SP/C (%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	SP
27.5	45	1.40	259	943	1206	13.20

s/m : モルタル中の細骨材の容積比 (%)

SP/C : SP 添加量 (%)

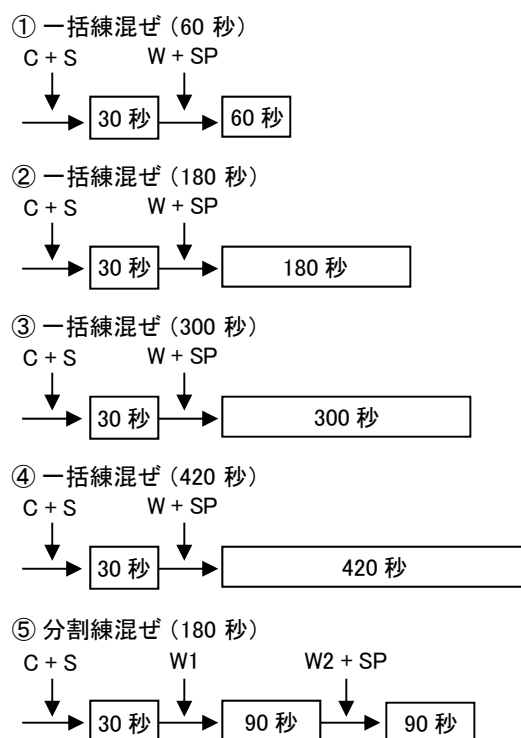
### (2) モルタルの練混ぜ方法

材料の練混ぜにはパドルミキサを用い、練混ぜ速度は低速 (自転速度 : 毎分 140±5 回転, 公転速度 : 毎分 62±5 回転) にて行った。

自己充填モルタルの練混ぜ方法を図-3 に示す。本研究では、①一括練混ぜ (60 秒)、②一括練混ぜ (180 秒)、③一括練混ぜ (300 秒)、④一括練混ぜ (420 秒)、⑤分割練混ぜ (180 秒) の 5 通りを設定して行った。ただし、各練混ぜ方法において共通して空練りを 30 秒間行った。

また、本研究ではモルタルの練混ぜをエネルギーの投入と見なし、練混ぜにより投入されたエネルギーがセメント粒子の凝集・分散状態を支配していると考えた<sup>3)</sup>。

練混ぜる時間が長いほど投入されるエネルギーが大きくなると見なした。また、練混ぜ水を分割することによりパドルミキサがモルタルを攪拌する際の抵抗が大きくなることから、総練混ぜ時間が同じ場合、分割練混ぜは一括練混ぜよりも投入されるエネルギーが大きくなると見なした。



C: 低熱ポルトランドセメント S: 細骨材 W1: 一次水 (W1/C = 20%) W2: 二次水 SP: 高性能AE減水剤

図-3 練混ぜ方法

### 2.2 観察結果

練混ぜ方法と練混ぜ時間が自己充填モルタルの Gm/Rm に及ぼす影響を図-4 に示す。

一括練混ぜ法では、練混ぜ時間が大きくなっても  $Gm/Rm$  はほとんど変化しなかった。一方、②一括練混ぜ (180 秒) と総練混ぜ時間が同じである⑤分割練混ぜ法 (180 秒) を比較すると、⑤分割練混ぜ (180 秒) の方がわずかに  $Gm/Rm$  が小さくなった。

一括練混ぜ法において、総練混ぜ時間が長くなっても  $Gm/Rm$  の変化がほとんどなかったことから、練混ぜエネルギーが大きくなっても高性能 AE 減水剤の粒子分散効果が同じであったと考えられる。つまり、粒子の分散状態の変化に伴うセメント粒子の比表面積の変化量と、高性能 AE 減水剤の吸着量の変化量が同じであったと考えられる。ただし、練混ぜエネルギーが大きすぎる場合には、セメント粒子の表面積の増加に高性能 AE 減水剤の吸着が追い付かなかったため、⑤分割練混ぜ (180 秒) での  $Gm/Rm$  が②一括練混ぜ (180 秒) より小さくなったと考えられる。

練混ぜ方法と練混ぜ時間が自己充填モルタルの  $Rm/Gm^{0.4}$  に及ぼす影響を図-5 に示す。

一括練混ぜ法では、練混ぜ時間が大きくなるにしたがって  $Rm/Gm^{0.4}$  が大きくなった。一方、②一括練混ぜ (180 秒) と総練混ぜ時間が同じである⑤分割練混ぜ (180 秒) を比較すると、⑤分割練混ぜ (180 秒) の方がわずかに  $Rm/Gm^{0.4}$  が大きくなった。

練混ぜによるセメント粒子の分散状態のモデルを図-6 に示す。一括練混ぜ法において、総練混ぜ時間が長くなるほど  $Rm/Gm^{0.4}$  が大きくなったことから、練混ぜエネルギーが大きくなるほど、セメント粒子が分散し凝集体内部から解放される自由水量が大きくなったと考えられる。よって、総練混ぜ時間が同じでも練混ぜエネルギーの大きい⑤分割練混ぜ (180 秒) の  $Rm/Gm^{0.4}$  が②一括練混ぜ (180 秒) より大きくなったと考えられる。

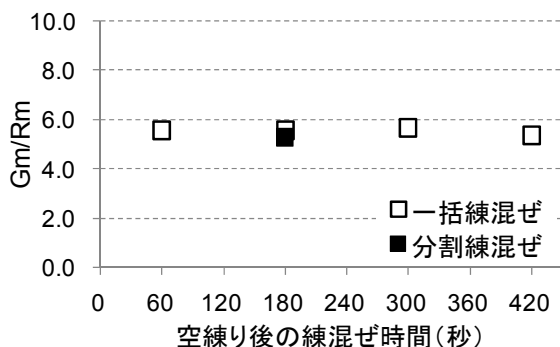


図-4 練混ぜ方法・時間による  $Gm/Rm$  の違い

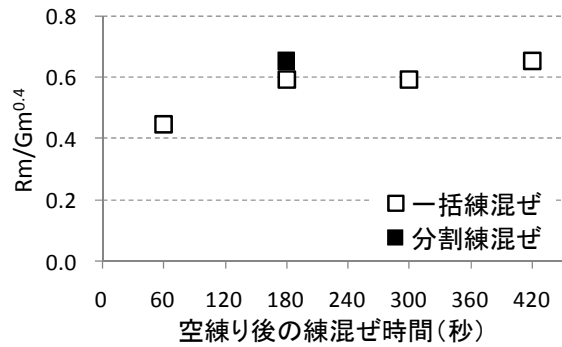


図-5 練混ぜ方法・時間による  $Rm/Gm^{0.4}$  の違い

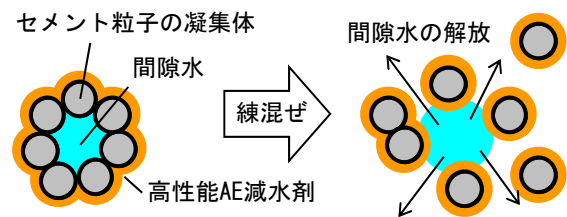


図-6 セメント粒子の分散状態の変化

### 2.3 観察結果から立てた仮説

以上の観察結果から、練混ぜによるエネルギーの投入が凝集セメント粒子の分散状態を変化させ、それに伴う高性能 AE 減水剤の吸着量と自由水量の変化が自己充填モルタルの流動性のメカニズムであると考え、以下の二つの仮説を立てた。

- (1) 高性能 AE 減水剤の添加量が十分大きければ練混ぜエネルギーが変化してもセメント粒子の分散効果は変化しない。
- (2) 水セメント比が大きいほど練混ぜエネルギーの増加に伴う自由水の増加量が大きくなる。

### 3. 仮説の検証方法

練混ぜエネルギーによる凝集セメント粒子の分散状態と高性能 AE 減水剤の吸着量の変化に着目した。配合条件を変化させ、練混ぜエネルギーの数値化および高性能 AE 減水剤の吸着量を測定し、メカニズムの解明を行った。

#### 3.1 使用材料と配合

使用した材料の物性は表-1 と同じものを使用した。

自己充填モルタルの配合を表-3 に示す。高性能 AE 減水剤の添加量は配合 No.1, 配合 No.2 および配合 No.4 における⑤分割練混ぜ (180 秒) での練上がり直後のモルタルフローを基準とし、モルタルフローが  $280 \pm 10$  mm になるように調節した。

表-3 自己充填モルタルの配合

No.	W/C (%)	s/m (%)	SP/C (%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	SP
1	25.0	45	1.60	246	985	1206	15.75
2	27.5	45	1.40	259	943	1206	13.20
3	27.5	45	1.20	259	943	1206	11.31
4	29.6	45	1.20	269	909	1206	10.91

s/m : モルタル中の細骨材の容積比 (%)

SP/C : SP 添加量 (%)

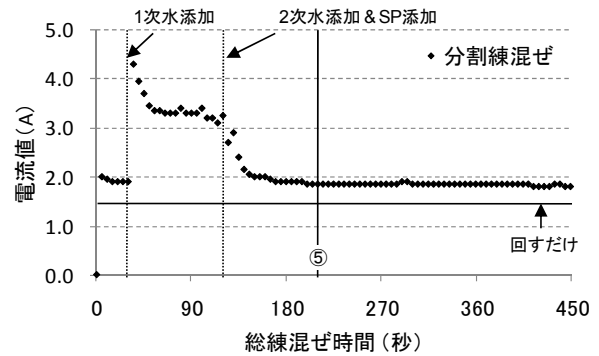


図-8 総練混ぜ時間とミキサの電流負荷値の関係

### 3.2 練混ぜエネルギーの数値化

自己充填モルタルの練混ぜ時に投入される練混ぜエネルギーは、直接測定することが非常に困難であるため、ミキサの電流負荷値を測定した。ミキサの電流負荷値はミキサにかかる電流値であるため、厳密には自己充填モルタルに直接与えられるエネルギーではないが、練混ぜ時の現象を判断する一つの指標になると考え、測定を行った。なお、測定方法は練混ぜ時間5秒毎に電流計のメモリを読み電流値を測定した。測定には表-2の配合の自己充填モルタルを用いた。

測定結果を図-7 に示す。本研究で使用したミキサは、作動させただけでの電流値は 1.55A を示した。

一括練混ぜでは、練混ぜ水及び高性能 AE 減水剤を投入することで電流値が 4.3A 付近まで急激に増加するが、その後、電流値は急激に小さくなり、総練混ぜ時間約 210 秒以降は 1.9A 付近でほぼ一定となった。

一方、分割練混ぜ法においても図-8 に示すように 1 次水投入後に電流値が 4.3A 付近まで急激に増加し、その後 3.3A 付近まで電流値が減少しそれ以降一定となった。しかし、2 次水および高性能 AE 減水剤の投入により電流値が急激に低下し、総練混ぜ時間約 210 秒以降の電流値は 1.9A 付近でほぼ一定となった。

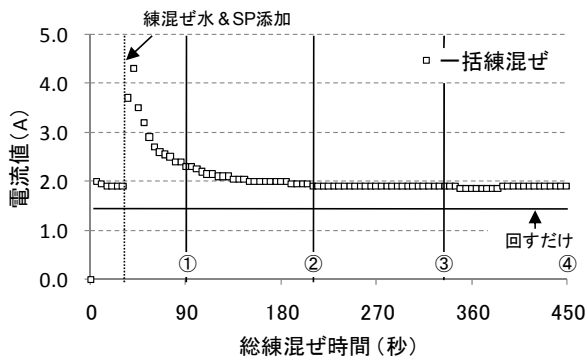


図-7 総練混ぜ時間とミキサの電流負荷値の関係

### 3.3 高性能 AE 減水剤の吸着量の測定方法

自己充填モルタルの液相中の未吸着の高性能 AE 減水剤量を測定するために、モルタルのサンプル (140g×6 本) を遠心分離機 (日立製, CR16RX アングルロータ : T11A34) により約 7000 G の重力を 7 分間作用させ液相を分離させた (図-9)。その後、液相中の炭素量を全有機炭素測定装置 (島津製, TOC-5000A) によって測定し、未吸着の高性能 AE 減水剤の見かけ量を求めた。この見かけ量から、高性能 AE 減水剤の吸着量を求めた。

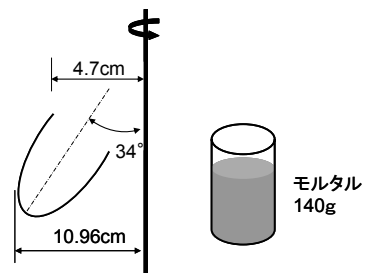


図-9 遠心分離方法の概要

## 4. 高性能 AE 減水剤の添加量の大小によるセメント粒子の分散効果への影響の検証

### 4.1 一括練混ぜにおける練混ぜ時間の違いによる検証

一括練混ぜにおける練混ぜ時間の違いによる Gm/Rm と高性能 AE 減水剤の吸着量の測定結果を図-10 に示す。高性能 AE 減水剤の添加量が同じであれば、吸着量も変化しても Gm/Rm が同じになった。SP/C = 1.60 %以外、プロットの左から右に行くに従い練混ぜ時間が大きくなっている。一方、SP/C = 1.60 %は練混ぜ時間と SP 吸着量との関係を見出すことができなかった。

一括練混ぜでは高性能 AE 減水剤の吸着量は練混ぜエネルギーの増加に伴って増加しているが、Gm/Rm は高性能 AE 減水剤の吸着量もほとんど変化しなかった。練混ぜエネルギーによる粒子の分散状態の変化に伴うセメント粒子の表面積の変化量と、高性能 AE 減水剤の吸着量の変化量が同じであったためと推定される。これについてはセメント粒子の単位表面積当たりの高性能 AE 減水剤の吸着量に着目して今後検討する予定で

ある<sup>4)</sup>。

また、高性能 AE 減水剤の添加量が大きくなるほど Gm/Rm および高性能 AE 減水剤の吸着量が大きくなった。このことから、練混ぜエネルギーが大きいほど凝集セメント粒子の分散状態が大きくなり、セメント粒子の表面積も大きくなるため、粒子に吸着することが可能な高性能 AE 減水剤の量が大きくなったと考えられる。ただし、配合 No.2 における①一括練混ぜ（60 秒）の吸着量の値が異常に小さいのは、図-7 に示すように、①一括練混ぜ（60 秒）ではミキサの電流負荷値が大きく変動しており、モルタルの流動性が不安定な状態になっていたためであると考えられる。

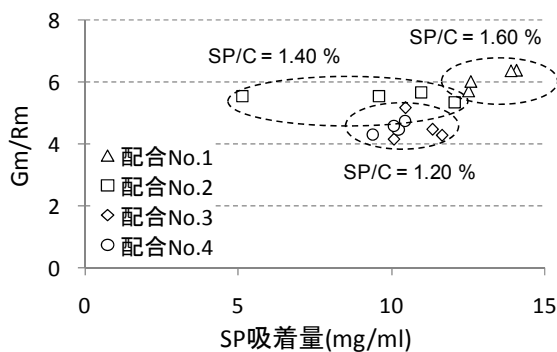


図-10 SP 吸着量の変化に伴う Gm/Rm への影響  
(一括練混ぜの場合)

#### 4.2 高性能 AE 減水剤の添加量が分割練混ぜによるセメント粒子の分散効果に及ぼす影響

高性能 AE 減水剤の添加量が分割練混ぜによる Gm/Rm の変化量に及ぼす影響を図-11 に示す。なお、図中の「Gm/Rm の変化量」とは⑤分割練混ぜ（180 秒）における Gm/Rm から②一括練混ぜ（180 秒）における Gm/Rm を引いたものである。なお、ここで比較するのは、分割練混ぜによってフローが  $280 \pm 10 \text{mm}$  となるように設定した配合 No. 1, 2 および 4 である。No. 3 のフロー値は適正な値よりも明らかに小さい、すなわち高性能 AE 減水剤添加量が適正值よりも小さいために比較の対象からは除外した。

⑤分割練混ぜ（180 秒）と総練混ぜ時間が同じである②一括練混ぜ（180 秒）の Gm/Rm を比較すると、配合 No.2 と配合 No.4 では Gm/Rm が小さくなった。このことから、短時間に大量のエネルギーが投入される分割練混ぜでは、粒子の分散によるセメント粒子の比表面積の増加に高性能 AE 減水剤の吸着が追い付かなくなり、Gm/Rm が減少したと考えられる。そして、高性能 AE 減水剤の添加量が少ない方がより吸着が追い付かなくなったと考えられる。

一方、配合 No.1 では Gm/Rm が大きくなった。分割練

混ぜにより高性能 AE 減水剤の添加量が多い配合 No.1 の Gm/Rm が増加した原因を明らかにすることはできなかった。Rm が小さくなったことが影響していると思われる。

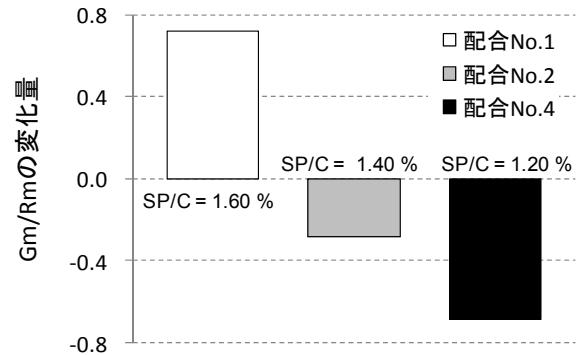


図-11 高性能 AE 減水剤の添加量が分割練混ぜによる Gm/Rm の変化量に及ぼす影響

### 5. 水セメント比の大小による自由水量の変化への影響の検証

#### 5.1 一括練混ぜにおける練混ぜ時間の違いによる検証

一括練混ぜにおける  $Rm/Gm^{0.4}$  と水セメント比の関係を図-12 に示す。一括練混ぜでは練混ぜ時間が長いほど  $Rm/Gm^{0.4}$  が大きくなった。これは図-6 に示すように、練混ぜエネルギーの投入により凝集セメント粒子の分散が大きくなり、凝集粒子内の間隙水が解放されて自由水となったと考えられる。そして、練混ぜエネルギーが大きくなるほど解放される間隙水が多くなったためであると考えられる。

しかし、仮説とは異なり、水セメント比が増加しても練混ぜエネルギーの増加による  $Rm/Gm^{0.4}$  の増加量はほとんど変化しなかった。

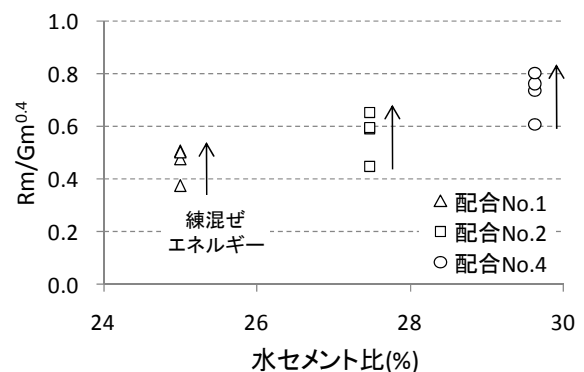


図-12 水セメント比による練混ぜエネルギーの増加に伴う  $Rm/Gm^{0.4}$  増加への影響（一括練混ぜの場合）

#### 5.2 分割練混ぜが自由水の変化量に及ぼす影響

水セメント比が分割練混ぜによる  $Rm/Gm^{0.4}$  の変化量

に及ぼす影響を図-13に示す。なお、図中の「 $Rm/Gm^{0.4}$ の変化量」とは⑤分割練混ぜ（180秒）における  $Rm/Gm^{0.4}$  から②一括練混ぜ（180秒）における  $Rm/Gm^{0.4}$  を引いたものである。なお、ここで比較するのは、4.2と同様に分割練混ぜによってフローが  $280 \pm 10 \text{mm}$  となるように設定した配合 No. 1, 2 および 4 である。

⑤分割練混ぜ（180秒）と総練混ぜ時間が同じである②一括練混ぜ（180秒）の  $Rm/Gm^{0.4}$  を比較すると、配合 No.2 と配合 No.4 では  $Rm/Gm^{0.4}$  が大きくなった。しかし、配合 No.1 では  $Rm/Gm^{0.4}$  がやや低下した。このことから、水セメント比が大きいほど凝集粒子に内包されている間隙水の量が多くなったため  $Rm/Gm^{0.4}$  の増加量が大きくなったと考えられる。ただし、図-14に示すように配合 No.1 のような低水セメント比の場合には、粒子の分散によって解放される間隙水がないため、逆にモルタル中の自由水がセメント粒子に拘束され、 $Rm/Gm^{0.4}$  が低下したと考えられる。

また、一括練混ぜの場合、水セメント比による練混ぜエネルギーの増加に伴う  $Rm/Gm^{0.4}$  の変化量への影響を見ることができなかったにもかかわらず、分割練混ぜとの比較では影響が顕著に表れたのは、分割練混ぜの方が一括練混ぜよりも練混ぜエネルギーが圧倒的に大きかったからであると思われる。

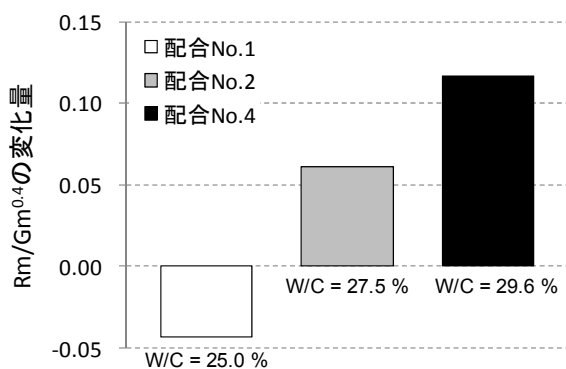


図-13 水セメント比が分割練混ぜによる  $Rm/Gm^{0.4}$  の変化量に及ぼす影響

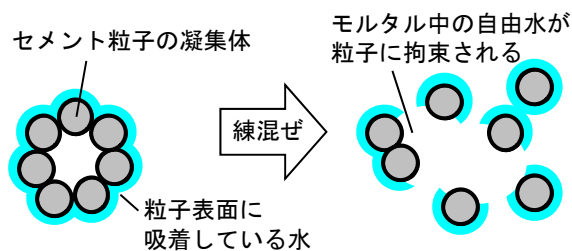


図-14 粒子の分散による自由水の減少

## 6. まとめ

本研究では、練混ぜ方法や練混ぜ時間の違いが自己充填モルタルの流動性に与える影響を、セメント粒子の凝集分散状態と自由水量の変化によるものと仮定し、高性能 AE 減水剤の吸着量の変化に着目して明らかにした。既往の研究より得られた、同じ練混ぜ方法において、

①  $Gm/Rm$  が高性能 AE 減水剤によるセメント粒子の分散効果となる。

②  $Rm/Gm^{0.4}$  が自由水量によって決まる。

の二つを前提とすると、本研究の結果から以下のことが言える。

(1) 高性能 AE 減水剤の添加量が十分であれば、短時間に大量の練混ぜエネルギーを投入しても  $Gm/Rm$  は小さくならない。一方、高性能 AE 減水剤の添加量が小さければ  $Gm/Rm$  は小さくなった。

(2) 一括練混ぜでは練混ぜエネルギーにかかわらず  $Gm/Rm$  は一定であった。この理由をセメント粒子の比表面積と併せて検討する必要がある。また、 $Gm/Rm$  は高性能 AE 減水剤の添加量の増加に伴い大きくなった。

(3) 一括練混ぜでは練混ぜエネルギーが大きくなるほど高性能 AE 減水剤の吸着量が大きくなるとともに、自由水も多くなった。しかし、自由水の増加量には水セメント比による違いはほとんどなかった。

(4) 水セメント比が大きい場合に大量のエネルギーを投入すると、自由水の量は大きくなったが、水セメント比が小さい場合に大量のエネルギーを投入すると、自由水の量はむしろ少なくなった。

謝辞：本研究を行うにあたり、高知工科大学社会システム工学科宮地日出夫助手にご指導頂きました。ここに記して深謝致します。

### 【参考文献】

- 1) 大内雅博ほか：自己充填コンクリート用高性能 AE 減水剤の効果の定量的評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，1998
- 2) 大内雅博ほか：自己充填コンクリート用モルタルの配合設計法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，1997
- 3) 中山知大・大内雅博：水セメント比と練り混ぜ方法が外力による自己充填モルタルの流動性変化に及ぼす影響，土木学会年次学術講演会概要集第 5 部，Vol.63，V-321，2008
- 4) 菅俣匠ほか：練混ぜ時における高性能 AE 減水剤の粒子分散効果に関する定量的評価，土木学会論文集，No.634，255-267，1999.11