

# 論文 水セメント比と練混ぜ方法の違いが外力の作用による自己充填モルタルの流動性変化に与える影響

中山 知大<sup>\*1</sup>・大内 雅博<sup>\*2</sup>

**要旨:** 水セメント比と練混ぜ方法の違いが外力の作用による自己充填モルタルの流動性変化に与える影響を、セメント粒子の凝集分散状態に着目して明らかにした。流動性変化の主要因が圧縮応力よりもせん断応力であることを見出した。水セメント比および練混ぜによる投入エネルギーが、セメント粒子の分散の程度、そして凝集したセメント粒子内部の間隙水量を変化させ、これが外力により生じたせん断応力により凝集粒子が分散した際に生じる自由水量の大小や、セメント粒子の表面積の増加度合いやそれに伴う単位面積当たりの高性能 AE 減水剤吸着量の減少量を変化させ、流動性変化量を決定するものと結論付けた。

**キーワード:** 自己充填モルタル, 流動性変化, 練混ぜ, 水セメント比, 凝集, 分散, 自由水

## 1. はじめに

### 1.1 本研究の目的

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施工にポンプ圧送は必要不可欠である。

しかし、ポンプ圧送の際、ポンプの筒先から吐出された自己充填コンクリートの流動性が圧送前と比べ変化する問題が生じている(図-1)。多くの場合、変形性の低下と粘性の低下の事例が報告されている。流動性が低下した場合、施工を阻害してしまう恐れがある。その一方で、流動性が増加する事例も報告されている。配合や使用材料の組み合わせ、圧送距離などによって流動性の変化が異なるため、定量的な予測が困難である。この現象の原因は完全には解明されていない。

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)の水セメント比や練混ぜ方法の違いが、外力による流動性変化にどのような影響を及ぼしているのかを明らかにすることである。

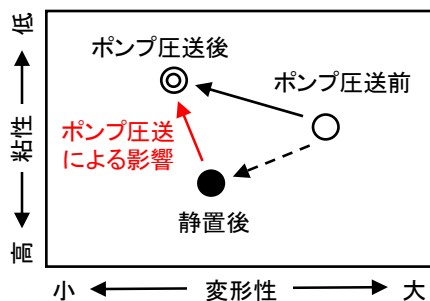


図-1 ポンプ圧送時による流動性変化として多く報告されている例

### 1.2 既往の研究

既往の研究より、自己充填コンクリートの流動性変化の要因はポンプ圧送時に自己充填コンクリート内に生じる応力であると考えられている。そして、その応力は、自己充填コンクリートを押し出すピストンによる圧縮力から生じる圧縮応力と、自己充填コンクリートとポンプの管壁との摩擦による速度差から生じるせん断応力であると考えられている(図-2)。

作業らは、外力による自己充填モルタルの流動性変化の原因としてセメント粒子の凝集・分散・反発状態の変化に着目し研究を行ってきた。練混ぜたモルタルを二つに分け、加圧および再練混ぜにより圧縮およびせん断応力を生じさせたモルタルと静置したモルタルの流動性をほぼ同時に比較することにより経時変化による影響を取り除いて、外力による流動性変化を定量的に求めることが可能となった。<sup>1)</sup>

コンクリート中のセメントは、比較的長い時間の練混ぜや高性能な分散剤・減水剤の使用によっても、粒子の分散が完全ではなく、鎖状あるいは塊状の凝集体を形成している。そして、この凝集体は、ポンプ圧送によって自己充填コンクリート内に生じた応力により分散させられる(図-3)。セメント粒子が分散することによってみかけの表面積が増加し、セメント粒子の単位面積あたりの高性能AE減水剤の吸着量が低下する。このセメント粒子の単位面積あたりの高性能AE減水剤の吸着量の低下が、ポンプ圧送による変形性低下の原因であることを明らかにした。<sup>2)</sup>

しかし、変形性が増加する場合については、セメント粒子の単位面積あたりの高性能AE減水剤の吸着量の低

\*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)

下のみでは説明不可能である。また、モルタルの粘性の変化のメカニズムについては未解明のまま残されており、課題となっていた。

### 1.3 本研究の前提

本研究では、流動性変化の違いが自己充填モルタルの配合および練混ぜ方法の違いに起因していると仮定し、これらを大きく変化した試験により観察を行い、流動性変化のメカニズムの解明を行った。作榮らによる既往の研究<sup>1)2)</sup>では、水セメント比の影響についてほとんど検討を加えていなかったためである。

配合の中でも特に水セメント比、および練混ぜ方法、すなわち自己充填モルタルの練混ぜ時に投入されるエネルギーによりセメント粒子の凝集・分散状態および吸蔵水や自由水量が変化し、これらが応力による流動性変化の差を引き起こしていると仮定した。また、変形性のみならず粘性の変化が、セメント粒子の凝集分散状態の変化により生じる自由水量の変化に起因し、その程度も配合や練混ぜ方法により変化すると仮定した。

ここで、本研究における流動性とは、重力や外力による流動全体を表すフレッシュコンクリートの性質を指す。変形性および粘性とは、流動性を構成する性質である。

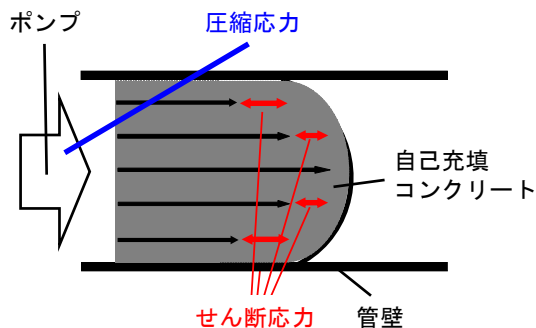


図-2 ポンプ圧送により生じるとされる応力

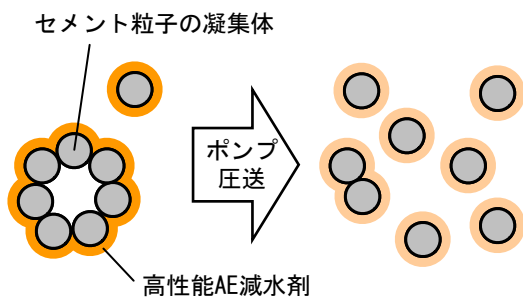


図-3 セメント粒子の分散状態の変化

## 2. 試験方法

### 2.1 使用材料および配合

使用材料を表-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減水剤の添加量は練上がり直後のモルタルフローが約280mm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 2.98 密度 2.69 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

No.	W/C (%)	s/m (%)	SP/C (%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	SP
1	25.2	45	1.50	246	978	1224	14.68
2	27.6	45	1.00	259	937	1224	9.37
3	29.8	45	0.85	269	904	1224	7.68
4	32.6	45	0.70	282	864	1224	6.05

s/m : モルタル中の細骨材の容積比 (%)

SP/C : SP 添加量 (%)

### 2.2 試験方法

自己充填コンクリートのポンプ圧送による流動性変化のメカニズムを解明するにあたり、本研究では、実験室レベルでの再現において自己充填コンクリートと同様の流動性変化が得られる自己充填モルタルを用いた(写真-1)。以下に説明する試験方法は作榮らにより考案された方法を踏襲したものである。

外気温によるフレッシュモルタルの流動性への影響を除外するため、室温20℃の恒温室内で試験を行った。

外力の作用による流動性変化の再現にあたり、プラントから施工現場までの運搬時間を考慮し、練上がり後30分間静置したモルタルを使用した。そして、30分間静置したモルタルを2つに分け、一方に外力を作用させ、もう一方はそのまま静置した。その後、それぞれのモルタルフローおよびロート流下時間をほぼ同時に測定し流動性を比較することにより、外力による流動性への影響を純粹に抽出した。<sup>1)2)</sup> (図-4)。

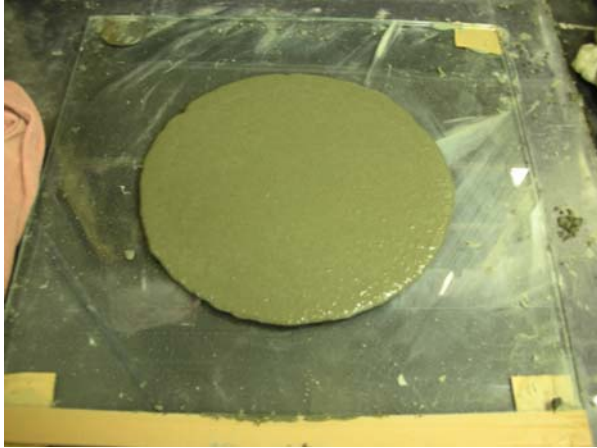


写真-1 自己充填モルタル

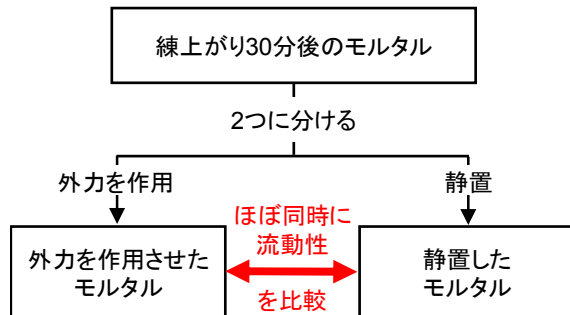


図-4 外力による流動性変化を測定する手順

### 2.3 各応力の再現方法

ポンプ圧送時に自己充填モルタル内に生じていると考えられる応力のうち、圧縮応力は、写真-2に示す内径125mm、深さ200mmの加圧ブリーディング試験機による加圧試験により再現した。圧縮力は8.8 N/mm<sup>2</sup>とし、非排水状態で作用させた。せん断応力は、パドルミキサにおいて初期に自転：105 rpm、公転：45 rpmで練混ぜたモルタルに自転：285 rpm、公転：125 rpmの回転速度で再度練混ぜを行うことにより再現した。



加圧ブリーディング試験機



パドルミキサ

写真-2 加圧ブリーディング試験機とパドルミキサ

### 2.4 変形性および粘性の評価方法

モルタルの変形性および粘性の測定には図-5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方を測定した。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 (Gm) を変形性の指標とした。

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

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-5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 (Rm) を粘性の指標とし、式(2)より求めた。

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

ここで、

$t$  : ロート流下時間 (秒)

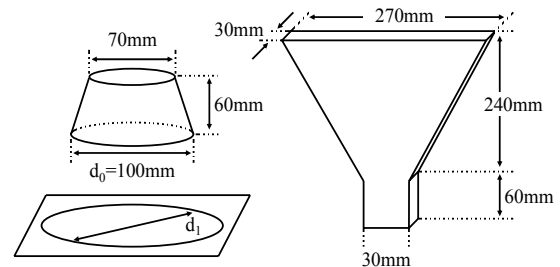


図-5 モルタルフローコーンおよびロート

### 3. 圧縮応力とせん断応力による流動性変化量の比較

予備実験として、ポンプ圧送時に自己充填モルタル内に生じていると考えられる圧縮応力とせん断応力の2つの応力のうち、どちらの影響が大きいのかを検証した。なお、モルタルは水セメント比を24.8%とし、図-6に示す練混ぜ方法で練混ぜた。

また、このとき再練混ぜおよび加圧ともに180秒間とし、それぞれの応力を生じさせた。ただし、これら2つの外力を同時に作用させることができないため再練混ぜ、加圧の順にモルタルに作用させた。

実験結果を図-7に示す。式(3)(4)より求めたGmの変化率およびRmの変化率から、流動性変化の比較を行った。その結果、せん断応力による流動性変化が圧縮応力による影響と比べて圧倒的に大きいことを確認できた。

ここで生じさせた圧縮応力の大きさは実施工の事例から求めたものであるが、せん断応力の大きさは不明である。しかしながら、同じ時間だけ生じさせたそれぞれの応力のうち、せん断応力の影響が圧倒的に大きく、圧縮応力によるそれは、これまでの実際のポンプ圧送による流動性変化量と比較すると極めて小さかった。

そこで本研究ではこれ以降、流動性変化の主要因であると考えられるせん断応力のみに着目した。

$$Gm \text{ の変化率 (\%)} = \{(\text{外力作用後 } Gm - \text{静置後 } Gm) / \text{静置後 } Gm\} \times 100 \quad (3)$$

$$Rm \text{ の変化率 (\%)} = \{(\text{外力作用後 } Rm - \text{静置後 } Rm) / \text{静置後 } Rm\} \times 100 \quad (4)$$

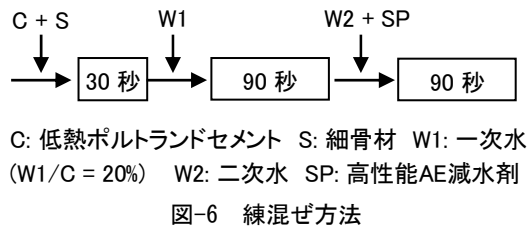


図-6 練混ぜ方法

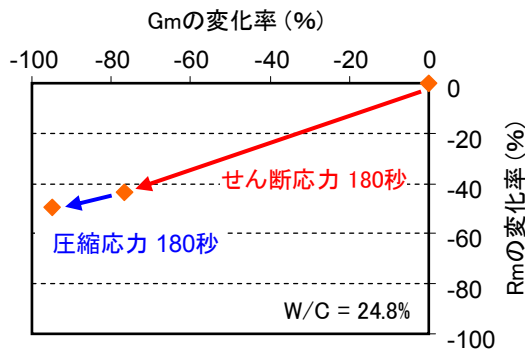


図-7 各応力による流動性への影響

#### 4. 練混ぜ方法と W/C がせん断応力による流動性変化に及ぼす影響

##### 4.1 実験概要

試験方法は「2. 試験方法」の通りであるが、予備実験の結果より生じさせる応力は、ポンプ圧送による流動性変化の主要因であると考えられるせん断応力のみとした。したがって、練上がり 30 分後のモルタルには、加圧ブリーディング試験器による加圧試験は行わず、パドルミキサによる再練混ぜのみを 60 秒間行い、せん断応力を生じさせた。

#### 4.2 モルタルの練混ぜ方法

モルタルの練混ぜ方法を図-8 に示す。本研究では、自己充填モルタルの練混ぜ方法を、①一括練混ぜ法 (60 秒), ②一括練混ぜ法 (180 秒), ③分割練混ぜ法 (180 秒) の3通りを設定して行った。

本研究ではモルタルの練混ぜを練混ぜエネルギーの投入と見なした。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・分散状態を支配することになる。練混ぜる時間が長いほど投入エネルギーが大きくなると見なした。一方、練混ぜ水を分割することにより、ミキサがモルタルをかき混ぜる際の抵抗が多くなることから、練混ぜエネルギーが大きくなると見なした。

したがって、本研究の練混ぜ方法の中では、①一括練混ぜ法 (60 秒) が最も練混ぜエネルギーが小さく、③分割練混ぜ法 (180 秒) が最も練混ぜエネルギーが大きくなると見なした。

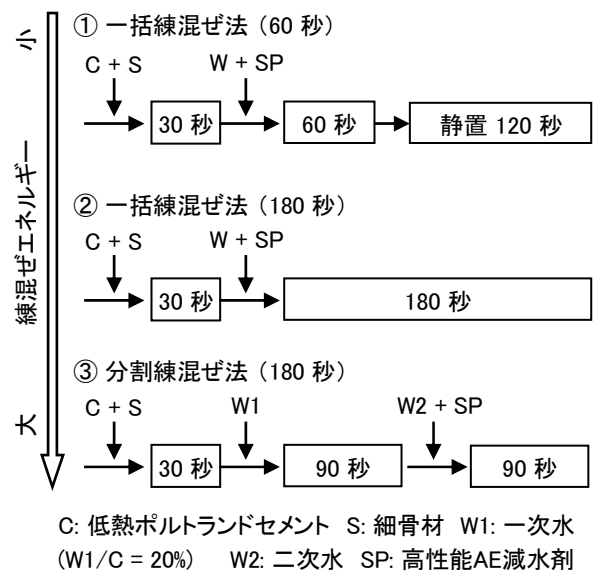


図-8 練混ぜ方法

#### 4.3 Rm の試験結果

相対ロータ速度比 Rm についての試験結果を図-9 に示す。ここでは式(5)より求めた Rm の変化量から自己充填モルタルの粘性の比較を行った。つまり、Rm の変化量が正の値のときは、せん断応力によってロータ流下時間が速くなったことを示し、負の値のときはせん断応力によってロータ流下時間が遅くなったことを示している。

試験の結果、①一括練混ぜ法 (60 秒), ②一括練混ぜ法 (180 秒), ③分割練混ぜ法 (180 秒) の全ての場合において、W/C が 25.2% の場合では Rm は減少したが、W/C が 27.6%, 29.8%, 32.6% の場合では、Rm は増加し

た。また、W/Cの増加に伴い、Rmの増加量が大きくなった。

また、練混ぜエネルギーの増加に伴い、W/Cが25.2%の場合ではRmの減少量が大きくなり、W/Cが27.6%、29.8%、32.6%の場合ではRmの増加量が小さくなった。

$$Rm \text{ の変化量} = \text{再} Rm - \text{静} Rm \quad (5)$$

ここで、

再Rm：再練混ぜ後のRm

静Rm：静置後のRm

である。

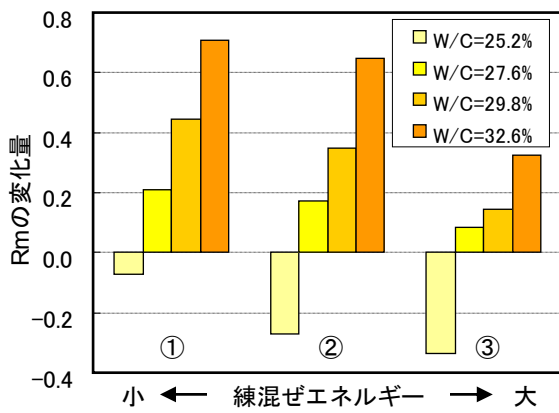


図-9 水セメント比および練混ぜエネルギーがRmの変化量に及ぼす影響

#### 4.4 Gmの試験結果

Gmについての試験結果を図-10に示す。ここでは式(6)より求めたGmの変化量から自己充填モルタルの変形性の比較を行った。すなわち、Gmの変化量が正の値の場合には再練混ぜによってモルタルフロー値が増加したことを示し、負の値の場合には再練混ぜによってモルタルフロー値が減少したことを示している。

試験の結果、①一括練混ぜ法(60秒)、②一括練混ぜ法(180秒)、③分割練混ぜ法(180秒)の全ての場合において、W/Cの増加に伴いGmの減少量が小さくなった。ただし、W/Cが32.6%の場合では、Gmが変化しないもしくはGmが増加した。

また、練混ぜエネルギーの増加に伴い、Gmの減少量がやや小さくなった。

$$Gm \text{ の変化量} = \text{再} Gm - \text{静} Gm \quad (6)$$

ここで、

再Gm：再練混ぜ後のGm

静Gm：静置後のGm

である。

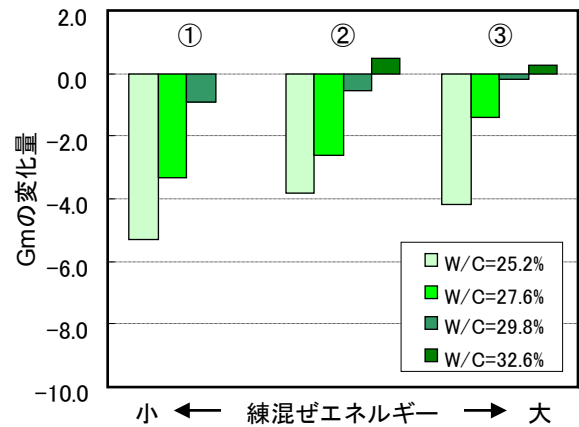


図-10 水セメント比および練混ぜエネルギーがGmの変化量に及ぼす影響

#### 5. 試験結果をもとにしたメカニズムの考察

自己充填モルタル中のセメント粒子が塊状の凝集体を形成している場合、セメント粒子の凝集体内には拘束されている水が存在している。セメント粒子がせん断応力によって分散させられると、この間隙水が開放され自由水となってモルタル中に出てくる。モルタル中の自由水が増加することによって、流動性が変化したと考えられる(図-11)。

そして、W/Cが大きくなるほどRmの増加量が増加し、Gmの減少量が小さくなりもしくはGmが増加したことから、W/Cが大きくなるとセメント粒子の凝集体内に拘束されている水の量が多くなっていると推測できる。ただし、W/Cが25.2%のようなW/Cが十分小さい場合には、凝集体内に水がほとんど存在せず、間隙水の解放によって流動性が変化するほどの自由水の増加が得られなかったと考えられる。

一方、練混ぜ時に投入されるエネルギーが大きくなるほど、Rmの変化量およびGmの変化量が小さくなったことから、練混ぜエネルギーが大きくなるほど、練上がり時のセメント粒子の分散状態が向上し、粒子の凝集体内に拘束されている水の量が減少したと推測できる。

既往の研究より明らかになっているモルタル内に生じる応力によってセメント粒子の凝集体が分散し、セメント粒子の単位面積あたりの高性能AE減水剤吸着量の低下する影響に加え、凝集体内部の間隙水が開放されることによる自由水の増加が、ポンプ圧送による自己充填コンクリートの流動性変化の原因であると思われる。

すなわち、セメント粒子の単位面積あたりの高性能AE減水剤の吸着量の低下という流動性低下の要因と、間隙水の解放による自由水の増加という流動性増加の要因

の2つの要因が存在し、これら2つの要因の合計が流動性の増減を左右している可能性があるということである。この説明を、②一括練混ぜ法（180秒）におけるGmの変化量を例として図-12に示す。

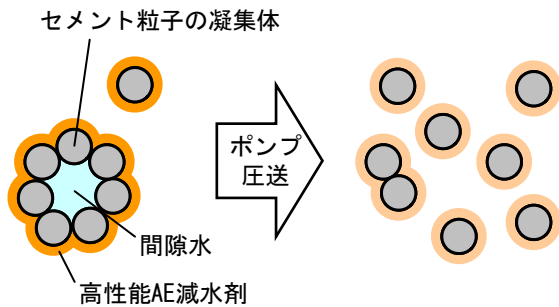


図-11 ポンプ圧送によるセメント粒子の分散状態の変化のイメージ

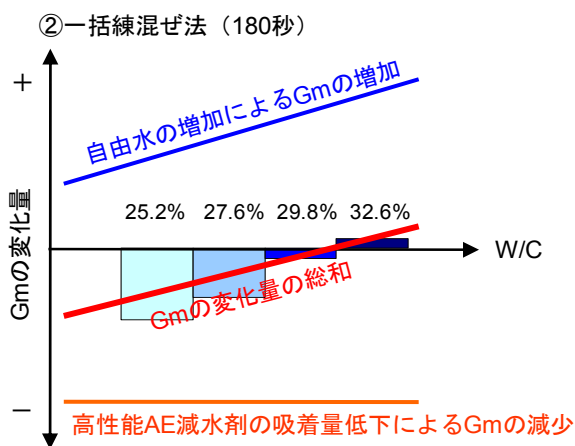


図-12 2つのGm変化の要因から得られるGm変化量の総和(中央の線が二つの要因の合計を示す)

## 6. まとめ

著者らはこれまで、ポンプ圧送による自己充填コンクリートの流動性変化が、外力によりモルタル内に生じる応力により変化したセメント粒子の凝集分散状態の変化に起因するとの立場に立ち、メカニズムの解明を行ってきた。

本研究では、水セメント比と練混ぜ方法の違いが外力の作用による自己充填モルタルの流動性変化に与える影響を観察し、セメント粒子の凝集分散状態に着目して流動性変化のメカニズムを説明した。

以下にまとめを記す。

- (1) 自己充填モルタルの流動性変化の主原因が圧縮応力よりもせん断応力であることを見出した。
- (2) 自己充填モルタルの配合上の水セメント比や練混ぜ方法(投入エネルギー)の違いが、外力の作用によるモルタルの流動性変化に大きく影響を及ぼしていることがわかった。
- (3) 水セメント比が大きいほど、また、練混ぜエネルギーが小さいほど、せん断応力による粘性の変化量(水セメント比が極端に小さくない限り増加)が小さくなった。一方、変形性の変化量(水セメント比が極端に大きくない限り減少)は小さくなった。
- (4) 水セメント比が大きくなるに従い凝集したセメント粒子内部に拘束される間隙水が多くなり、せん断応力による凝集粒子の分散によって生み出される自由水量が多くなるため、ロート速度の変化量が大きくなると仮定すると現象を上手く説明できた。
- (5) 練混ぜ時の投入エネルギーが大きくなるほどセメント粒子が良く分散し、凝集したセメント粒子内部に拘束される間隙水量が少なくなり、これがせん断応力により凝集粒子が分散した際に生じる自由水量を少なくし、ロート速度の変化量が小さくなると仮定すると現象を上手く説明できた。
- (6) フロー試験結果により示される変形性については、上記(4)(5)で述べたせん断応力により生じる自由水量の増減に加えて、これまでに明らかになっている水セメント比や練混ぜ方法の違いにより生じるセメントの比表面積の増加による単位表面積あたりの高性能 AE 減水剤吸着量の減少による変形性の減少、の二つの要因を合計すると現象を説明できる可能性がある。

現在、ミクロな分析により上記の説の検証を行っている。

## 【参考文献】

- 1) 作栄二郎・大内雅博：ポンプ圧送によるフレッシュモルタルの流動性変化の再現，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，Vol.60，5-339，2005
- 2) 作栄二郎・大内雅博：ポンプ圧送による自己充填コンクリートの流動性変化のメカニズム，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.79-84，2007
- 3) 中山知大・大内雅博：水セメント比と練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