

論文 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

作 栄 二郎^{*1}・大内 雅博^{*2}・筒井 浩平^{*3}

要旨：ポンプ圧送により生じる自己充填コンクリートの流動性変化の原因をセメント粒子の分散状態の変化と仮定し，外力を作用させたモルタルの圧縮強度，高性能 AE 減水剤の吸着量および比表面積の測定により検証した。その結果，外力の作用によりセメント粒子が分散することで見かけ上のセメント量が増加し，セメント単位表面積あたりの高性能 AE 減水剤の吸着量が低下することで流動性が変化することが明らかとなった。

キーワード：自己充填コンクリート，ポンプ圧送，外力，高性能 AE 減水剤，比表面積

1. はじめに

構造物の高層化や複雑化に伴う施工性の向上のため，自己充填コンクリートのポンプ圧送は必要不可欠である。ところが，ポンプ筒先の自己充填コンクリートの流動性が向上あるいは低下する現象が生じている。重力の作用のみで型枠に充填することが前提の自己充填コンクリートの施工を阻害してしまう恐れがある。

本研究の目的は，この流動性低下のメカニズムを解明することである。

ポンプ圧送によりコンクリート中に生じる応力を図-1 に示す。ピストンによる圧縮応力と管壁との摩擦によるせん断応力が生じていると仮定した。本研究では自己充填コンクリートのモルタル部分に着目した。練り上がったモルタルに加圧ブリージング試験装置を用いて圧縮力を作用させ，そして，モルタルミキサによる再練混ぜによりせん断力を作用させることによってポンプ圧送によりコンクリート中に生じる応力状態を再現した¹⁾。

その結果をもとに，セメント粒子の分散状態に着目し，その比表面積および高性能 AE 減水剤（以下 SP と称する）の吸着量の変化の測定から，外力の作用に伴うセメント粒子の分散状態と流動性変化との因果関係の検証を行った。

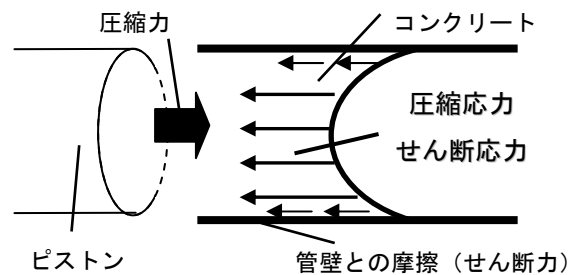


図-1 ポンプ圧送により生じる応力

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件

使用材料を表-1 に，配合条件を表-2 に示す。自己充填コンクリート用モルタルとして最適な流動性を有する配合 A-1 を基準とし，SP の添加量を増加させた A-2，水セメント比を増減させた B-1 および C-1 の 4 つの配合を用いた。

表-1 使用材料

材料	仕様
低熱ポルトランドセメント	密度 3.22 g/cm ³ ブレン値 3,430 cm ² /g
砂岩系砕砂 (高知県西分産)	比重：2.72, FM：3.00 0.15 mm 以下 0.3%
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系

*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 高知工科大学助教授 工学部社会システム工学科 博士(工学) (正会員)

*3 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

表-2 自己充填モルタルの配合

配合	W/C	s/m	SP/C	単位量 (kg/m ³)			
	(%)	(%)	(%)	水	セメント	細骨材	SP
A-1	28.6	45	0.78	264	922	1224	7.19
A-2	28.6	45	0.85	264	922	1224	8.76
B-1	29.8	45	0.78	269	904	1224	7.05
C-1	27.0	45	0.78	256	947	1224	7.39

ここに,

2.2 外力の作用条件

本研究では、ある実施工現場において、ポンプ圧送により定常的に大きな流動性変化を生じた圧送高さ 40 m に必要であった圧力 8.9 MPa を試料に加えることとした。JSCE-F 502-1990 に定められている加圧ブリージング試験器によって 8.9 MPa の圧力を非排水状態で加えた。その後、せん断応力を、ミキサでの再練混ぜ(自転：285 rpm、公転：125 rpm)により生じさせた。外力の作用時間は、実施工におけるポンプ圧送所要時間(同一の試料に対するに外力の作用時間)を参考に、圧縮・せん断をそれぞれ 1 分、3 分または 5 分間とした。

なお、試料には、再練り混ぜによる空気量の増加を抑えるため消泡剤を添加した。

2.3 モルタルの流動性

プラントから実施工現場までの輸送時間を想定して、練り上がったモルタルを 30 分間静置し、その後に試料を 2 つに分け、一方には外力を作用させ、もう一方はその間静置した。その後、それぞれに以下に示す、自己充填コンクリート用モルタルのフロー試験およびロート試験²⁾を行い、相対フロー面積比 G_m および相対ロート速度比 R_m を求めた。ここでは、 G_m を変形性の指標、 R_m を粘性の指標(R_m が大きいほど粘性が小さい)とした。

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

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

d_1 : モルタルフローの直径 (mm)

d_0 : フローコーンの直径：100 mm

t : ロート流下時間(秒)

そしてこれらから、SP の分散効果の指標および自由水の流動効果の独立指標を求めた³⁾。

$$\text{SP の効果} = G_m/R_m \quad (3)$$

$$\text{自由水の効果} = R_m/G_m^{0.4} \quad (4)$$

これらは、配合上の SP 添加量や水粉体比の変化に対応する流動性変化の定量的指標であり、本研究においては、モルタル中のセメント粒子の分散や SP の吸着の変化を推定する指標として使用した。

2.4 セメントの分散状態および SP 吸着量

セメント粒子の分散状態を間接的に知る方法として、モルタルの標準養生での材齢 7 日間の圧縮強度を求めた。

SP の吸着量は、モルタルからろ液を遠心分離機によって約 7,000 g を 5 分間作用させて抽出し、SP に含まれる炭素量の測定から、セメント 1 g あたりの見掛けの吸着量を求めた。

モルタル中のセメント粒子の比表面積の測定は、モルタルをアセトンで水和を停止させ、40℃ の環境で 24 時間乾燥させた試料を 75μm のふるいで篩い、得られた試料を BET 法より求めた。

3. 外力の作用が流動性に及ぼす影響

各配合における、外力の作用が流動性に与える影響を、基準配合 A-1 との比較により示す(図-2～図-4)。図中の数字は外力の作用時間を表し、矢印は流動性が外力の作用による流動性変化の方向を示している。

実験結果から、基準配合 A-1 に対して、SP 添加量あるいは単位水量により、外力の作用による流動性変化が大きく異なったことが分かる。配合による流動性変化の違いを示す結果となった。

図-5 に、外力を作用させたモルタルと、その間静置を行ったモルタルとの G_m の比較(=変化率)を示す。概して、外力の作用時間の増加に伴って G_m の低下率が大きくなる傾向にあった。

また、基準配合 A-1 に対して水セメント比あるいは SP 添加量を増加させると、 G_m の低下率は小さくなった。一方、水セメント比を低下させた C-1 では、低下率が著しく大きくなった。

以上まとめると、 G_m は、水セメント比あるいは SP 添加量を増加させることによって、外力の作用による変化が小さくなった。さらに、A-2 と B-1 との比較により、外力を作用させる前の粘性が低いほど G_m の低下率が小さくなった。

図-6 に外力を作用させたモルタルと、その間静置を行ったモルタルとの R_m と比較(=変化率)を示す。全体的に G_m に比べて変化率が小さい結果が得られたが、C-1 の R_m が G_m と同様に作用時間 1 分においてすでに著しく減少したため、それ以降の測定を行うことができなかった。

C-1 を除いて、外力の作用時間 1 分では配合条件によらず R_m が 10%~20%低下した。その後は配合条件によって異なった。A-1 では、作用時間を増加させていくにつれて、静置したモルタルよりも R_m が増加した。一方、A-2 では、静置したモルタルと比較すると R_m はやや小さかった。B-1 では、20%程度小さいままで推移した。

SP 添加量が多い配合と水セメント比が高い配合では、外力の作用による流動性の低下量が小さくなったといえる。

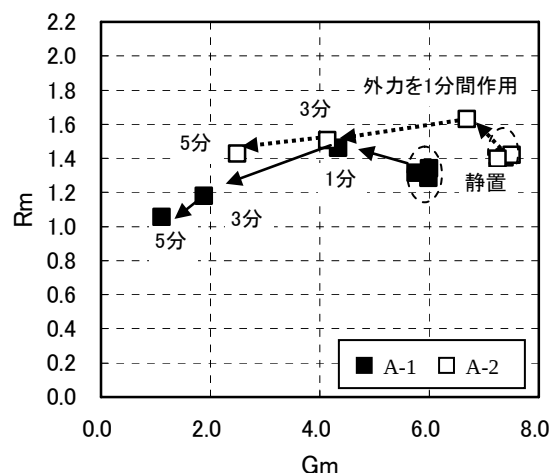


図-2 SP 添加量の差による流動性変化の違い

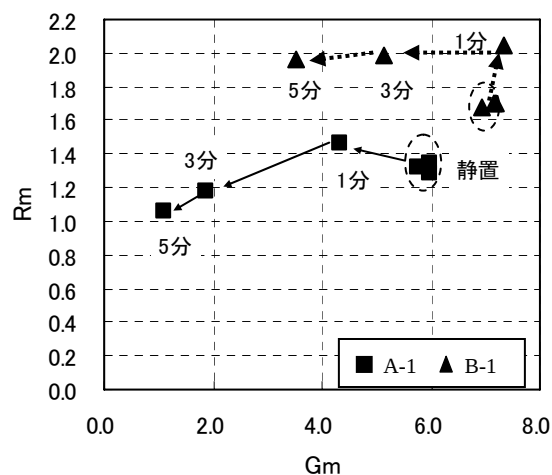


図-3 W/C の差による流動性変化の違い

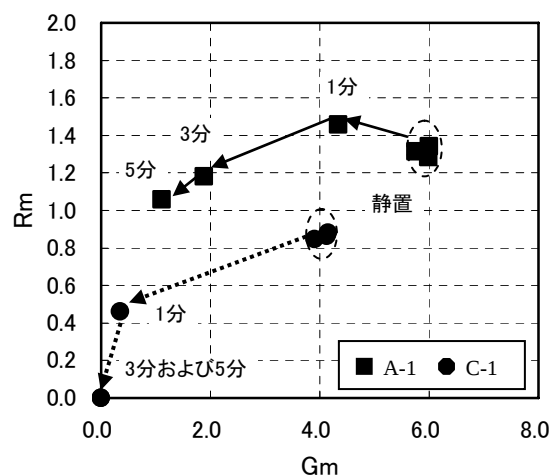


図-4 W/C の差による流動性変化の違い

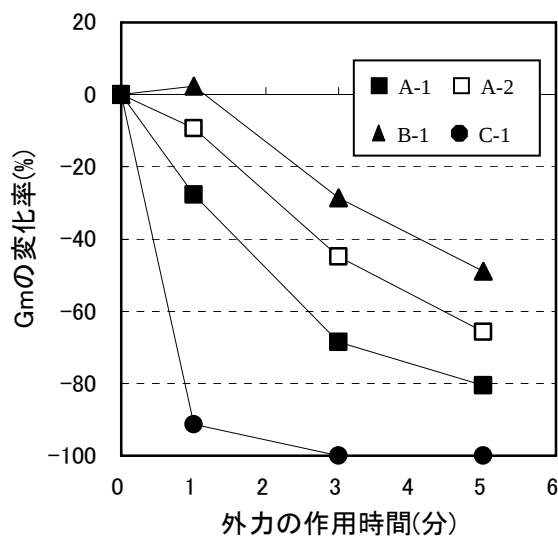


図-5 外力の作用による変形性の変化率
【変化率 = {(外力作用) - (静置)} / (静置)】

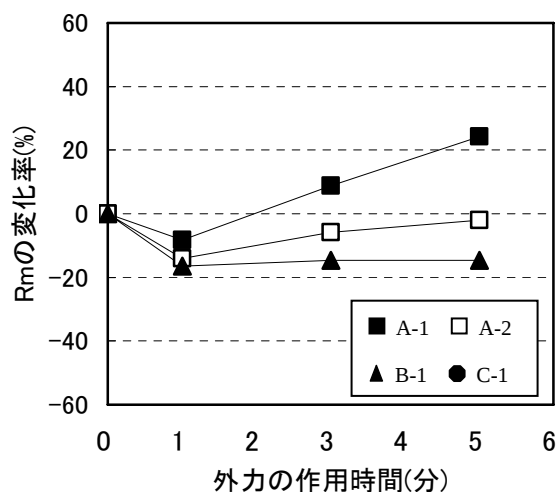


図-6 外力の作用による粘性の変化率
【変化率 = {(外力作用) - (静置)} / (静置)】

4. セメントの粒子分散に着目した流動性低下メカニズムの解明

4.1 圧縮強度から推定するセメント粒子の分散状態の変化

外力の作用と圧縮強度の関係を図-7 に示す。配合条件に関係なく、作用時間の増加に伴い圧縮強度も増加した。A-1 と A-2 では、外力の作用時間が 5 分に至ると、静置した水セメント比が低い C-1 のモルタルと同程度の圧縮強度まで増大した。

圧縮強度は、水とセメント粒子との水和反応によって得られる。その際、セメントの粉末度が反応速度に影響し、粒子径が小さいほど水和の進行が速く、凝結時間も早くなり、強度発現が速いとされている⁴⁾。

今回、外力を作用させた場合の圧縮強度の増加は、水セメント比を低下させた場合の現象と同様の傾向がみられた。すなわち、外力の作用に伴いセメント粒子が分散し、見かけ上セメント粒子が増加する。その結果、未水和粒子の割合が低下し、水和物の増加に伴う空隙率の低下によって圧縮強度が増加したものと思われる。

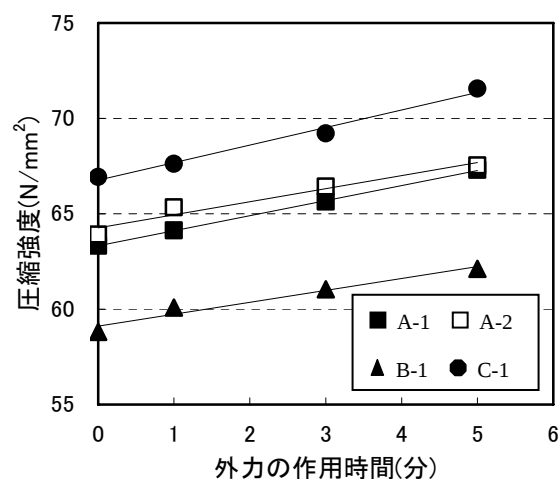


図-7 外力の作用と圧縮強度の変化

4.2 高性能 AE 減水剤の吸着量への影響

外力の作用が SP 吸着量に及ぼす影響を図-8 に示す。外力を作用させると SP 吸着量が増加したが、流動性は低下するという一見すると相矛盾する結果となった。

初期の練混ぜ時間と流動性に関する既往の研究では、練混ぜ時間を増加させていくことでセメント粒子表面の水和反応が進行し、SP のセメント単位表面積あたりの吸着量が低下することが示されている⁵⁾。

本研究では、モルタル中にせん断応力を生じさせるために再練混ぜを行っている。すなわち、既往の研究と同様に、セメント粒子の分散に伴って SP の吸着面積が増加することによる単位面

積あたりの SP 効力の低下が、流動性の低下に影響を及ぼしていると考えた。

以上、外力の作用による流動性変化は、圧縮強度および高性能 AE 減水剤の吸着量が増加したことから、セメント粒子の分散状態の変化による影響である可能性が得られたものと思われ、以下の検討を行った。

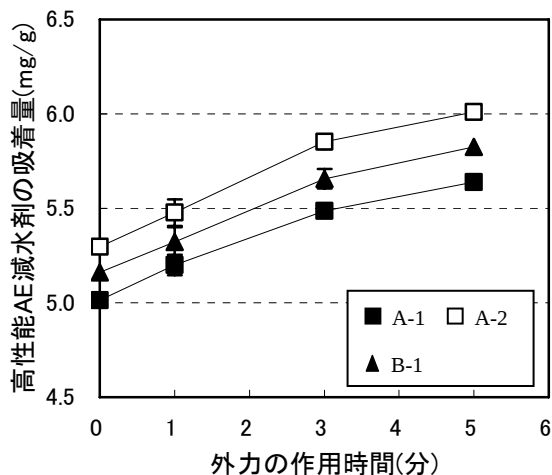


図-8 外力の作用と SP 吸着量の関係

4.3 外力の作用がセメント粒子の比表面積に与える影響

外力の作用によるセメント粒子の分散がモルタルの流動性に与える影響を解明するため、基準配合の A-1 と SP 添加量を増加させた A-2 についてセメント粒子の比表面積の測定を行った。その結果を図-9 に示す。比表面積は、作用時間が 1 分から 3 分までは大きく増加する結果となった。セメント粒子が外力の作用によって分散したものと思われる。一方、3 分から 5 分にかけてはさほど変化しなかった。

一方、流動性試験では作用時間 1 分から 3 分までは大きく低下したが、3 分から 5 分にかけては変化率が小さかった結果が得られている(図-5)。

現時点では、セメント粒子の分散(=比表面積の変化)が直接流動性の変化に結びついていると言うことは不可能である。

ただし、図-7 においては、3 分から 5 分の間であっても、外力の作用時間の増加に伴い強度が直

線的に増加している。この結果からは、3 分から 5 分の間であっても表面積が増加した可能性があるものと思われる。今回用いた比表面積測定法の是非について、今後検討の余地があるものと思われる。

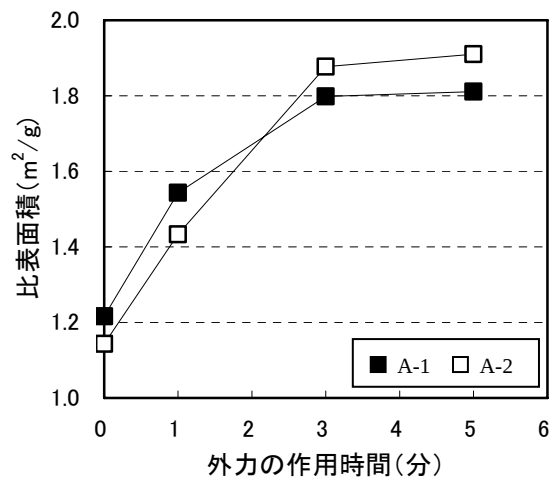


図-9 外力の作用と比表面積の関係

4.4 セメント単位表面積あたりの SP 吸着量

図-10 に外力の作用時間とセメント単位表面積あたりの SP 吸着量の関係を示す。作用時間 1 分においては A-2 の方が大きかったが、3 分と 5 分では、両配合において 3.1 mg/m^2 程度の値を示した。

次に、セメント単位表面積あたりの SP 吸着量と式(3)、(4)より求めた SP および自由水の効果の指標との関係を図-11 および図-12 に示す。セメント単位表面積あたりの SP 吸着量が多いほど SP の効果が大きくなる関係が得られた(図-11)。4.3 にて述べたようにセメント粒子の比表面積の測定方法に課題は残るが、これが変形性、特に流動性低下の主要因であると思われる。

一方、自由水の効果は外力の作用時間の増加に伴って増加した(図-12)。これについては、 R_m の変化率よりも G_m の減少率のほうが大きいことに起因するものと思われるが、本研究では、 R_m の増加、ひいては粘性の低下について原因を解明することは出来なかった。今後の課題としたい。

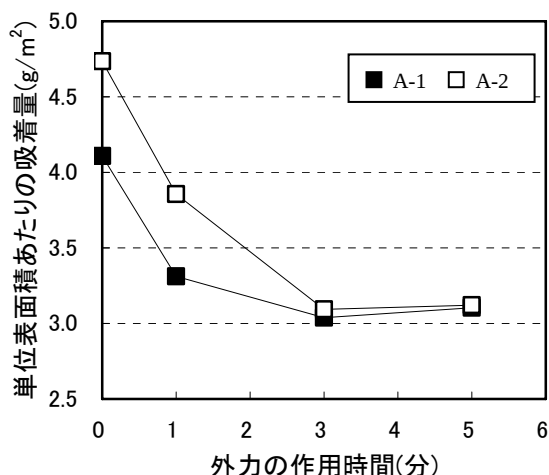


図-10 外力の作用とセメント単位表面積あたりの SP 吸着量の関係

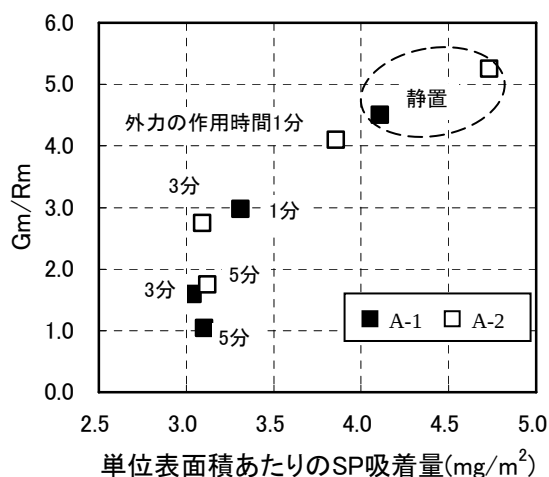


図-11 セメント単位表面積あたりの SP 吸着量と SP の効力との関係

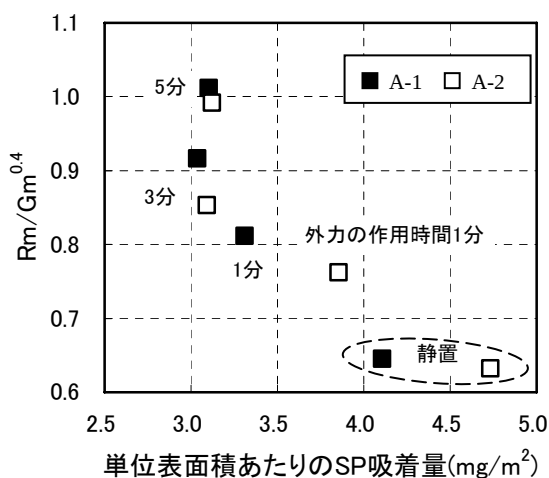


図-12 セメント単位表面積あたりの SP 吸着量と自由水の効力との関係

5. まとめ

本研究では、ポンプ圧送による自己充填コンクリートの流動性の低下現象とモルタルを用いた応力状態の再現することによりメカニズムの解明を行った。以下にまとめを示す。

- (1) 外力を作用させる前の流動性が作用後の流動性変化に大きく影響を及ぼし、流動性が高い配合においては流動性の変化量が小さくなった。
- (2) 外力による流動性低下についてセメント粒子の分散状態に着目し、圧縮強度および SP 吸着量の測定を行った。その結果、外力の作用によるセメント粒子の分散が間接的に認められ、また、SP 吸着総量の増加が認められた。
- (3) 測定方法に課題は残るが、セメント粒子の比表面積の測定から、セメント粒子が外力の作用によって分散していることと思われる。一方、セメント単位表面積あたりの SP 吸着量は減少し、これが外力による変形性低下の原因であるものと推定した。
- (4) 一方、今回明らかに出来なかった粘性の変化の原因の解明が今後の課題である。

参考文献

- 1) 作栄二郎, 大内雅博, 岡本圭介: 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, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, pp.677-678, 2005.9
- 2) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9
- 3) 大内雅博, 日比野 誠, 菅俣 匠, 岡村 甫: 自己充填コンクリート用高性能減水剤の効果の定量評価法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 1, pp. 129-134, 1998.7
- 4) 深谷泰文, 露木尚光: セメント・コンクリート材料科学, 技術書院, pp.68-99, 2003.10
- 5) 菅俣 匠, 枝松良展, 大内雅博: 高性能 AE 減水剤の分散保持作用に関する定量評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No.2, pp. 163-168, 2000.7