

論文 高流動コンクリートのポンプ圧送時の性状変化に関する一考察

横井 謙二^{*1}・横田 和直^{*2}・新藤 竹文^{*3}

要旨：本論文は、ポンプ圧送前後の高流動コンクリートの性状変化を明らかにするため、単純モデルでの静的な加圧実験、ならびに、実規模のポンプ圧送実験により、その影響要因について検討したものである。その結果、高流動コンクリートのポンプ圧送に伴うスランプフローの低下は、主に加圧作用による降伏値の増加に起因して生じることが明らかとなった。

キーワード：高流動コンクリート、ポンプ圧送、スランプフロー、降伏値、塑性粘度

1. はじめに

高流動コンクリートの施工時における問題点の一つに、ポンプ圧送後の筒先における流動性の変化がある。これまでに高流動コンクリートのポンプ圧送時の性状変化に関して報告された事例[1]を見ると、圧送後のスランプフローの変化は一樣ではなく、小さくなる場合と若干大きくなる場合があり、ポンプ圧送前後の性状変化は、いまだ明確にはなっていない。このようなポンプ圧送によるフレッシュコンクリートの性状変化の主な原因の一つに、高流動コンクリートに不可欠な高性能AE減水剤の影響が考えられ、特に、高性能AE減水剤の添加量の多少によって、圧送後のフレッシュコンクリートの性状変化に違いが生じるものと考えられる。

本論文は、高流動コンクリートにおけるポンプ圧送時の性状変化を明らかにするため、単純にモデル化した静的加圧実験と実規模のポンプ圧送実験を実施し、ポンプ圧送前後のコンクリートの流動特性とモルタルのレオロジー特性の変化についてまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 測定項目

自己充填性を有する高流動コンクリートについて、ポンプ圧送前後のフレッシュ状態での性状変化を把握するため、コンクリートの流動特性とモルタルのレオロジー特性を測定した。

(1) コンクリートの流動特性

コンクリートの流動特性は、スランプフローで評価した。スランプフローは、自重のみでの変形能力を示す流動性の指標である。

(2) モルタルのレオロジー特性

フレッシュコンクリート試料を5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタル試料について、レオロジー特性値を測定した。試験は、外筒回転式回転粘度計[2]を用いて行った。外筒を2分間に回転数を0～50rpmまで変化させて行き、その間の角速度と内筒に加わるトルク値の関係から、塑性粘度(η)と降伏値(τ)を算出した。

*1 大成建設(株)技術研究所 材料研究部土木材料研究室研究員、工修(正会員)

*2 大成建設(株)大阪支店 主任、(正会員)

*3 大成建設(株)大阪支店 課長、工博(正会員)

2.2 実験方法

(1) 静的加圧実験

ポンプ圧送時の配管内の圧力環境を模擬的に想定して、コンクリートの静的加圧実験を行った。実験方法は、既往の研究 [3] を踏まえて、図-1に示す圧力容器を用いた。直前にスランプフローの測定を行った試料を容器に入れ、排水しない条件で 5 N/mm^2 の荷重を5分間持続载荷した。徐荷した後、試料を速やかに取り出し、所定の測定を行った。実験は、静置試料（加圧前）のスランプフローが50cmを下回る時間まで、15～30分程度の適当な間隔で時間を追って測定した。

(2) ポンプ圧送実験

実験は、最大吐出量 $100 \text{ m}^3/\text{hr}$ 、最大理論吐出圧力 8 N/mm^2 の油圧ピストン式（シリンダ内径205mm、最大ストローク2050mm）のコンクリートポンプ車を用いて行った。圧送配管の詳細を図-2に示す。水平配管で約150m区間を、公称圧送量 $20 \sim 40 \text{ m}^3/\text{hr}$ で圧送し、コンクリートポンプの主油圧ならびに図-2に示すP1～P9の各位置における管内圧力を測定した。管内圧力の測定は、配管の上部に設置したダイヤフラム型圧力計を用いて行った。

フレッシュコンクリートの物性の測定は、圧送の前で行った。圧送前の試料は、ポンプ車への投入直前の試料を生コン車から採取し、圧送後の試料は、ピストン容量とストローク数との関係から、圧送前に採取した試料と同一時点の試料が筒先から排出されたと判断したとき採取した。ここでは、実験条件として、吐出量、高性能AE減水剤の添加量、コンクリートの圧送までの経過時間に着目した。

2.3 検討配合

本検討で適用した高流動コンクリートは、低発熱型の3成分系セメントと分離低減剤を用いた併用系であり、水結合材比 $W/P=33\%$ 、細骨材率 $s/a=51\%$ とし、空気量を4.5%とした。

静的加圧実験では、容量100ℓのパン型ミキサを用いて混練し、練上り温度 20°C として、加圧以前の目標スランプフローを3段階に分け、練上り30分後にそれぞれ60～65cm、65～70cm、70～75cm程度の流動性を有するように高性能AE減水剤の添加量を調整した。ここでは、高性能AE減水剤の主成分量の違いを比較するため、架橋ポリマーを含まないものを用いた。

ポンプ圧送実験では、市中のプラントにおいてコンクリートを製造し、アジテータ車で試験場所まで約30分で運搬した試料（荷卸し時点のコンクリート温度： $15.0 \sim 17.5^\circ\text{C}$ ）を用いた。ここでは、時間の経過により急激なスランプロスが起きないようにするため、高性能AE減水剤には架橋ポリマーを含むものを用い、室内試験練りにより、各配合の添加量を調整した。なお、各配合とも、ウェットスクリーニングしたモルタル試料から、加圧経過によって抽出した液相中に含

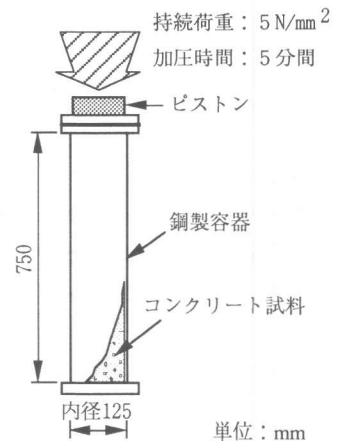


図-1 静的加圧実験装置

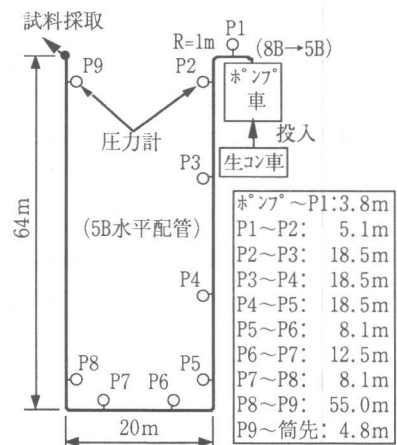


図-2 圧送配管および計測器設置位置

まれる有機炭素量を全有機体炭素計によって測定し、液相中の残存量から吸着量を算出した。

各実験ケースのコンクリートの配合ならびに使用材料を表-1に示す。各配合とも、U形充填試験装置 [2] により充填高さを測定し、自己充填性が良好であることを確認した。

表-1 高流動コンクリートの配合・使用材料および基本性状

配合 No.	単位量 (kg/m ³)						(1)静的加圧試料の 練上り30分時性状				(2)ポンプ圧送試料の 荷卸し時性状					
	W	P	S	G	Sp (P*%) (1)/(2)	Bp	スラン プ 高 (cm)	充填 高 (cm)	塑性 粘度 (Pa·s)	降伏値 (N/m ²)	スラン プ 高 (cm)	充填 高 (cm)	塑性 粘度 (Pa·s)	降伏値 (N/m ²)	混和剤 吸着量 (mg/g)	混和剤 吸着率 (%)
C-1					1.30/1.8		62.0	35.0	5.51	7.94	69.5	35.5	7.16	23.0	15.7	86
C-2	165	500	809	807	1.40/2.0	1.0	68.5	36.0	5.93	7.16	71.5	36.0	5.64	14.7	16.5	83
C-3					1.55/2.2		76.0	36.5	4.57	3.14	77.0	36.5	3.40	9.22	19.1	87

種別	記号	名称	品質
結合材	P	低発熱型3成分系セメント (OP:BS:FA=35:45:20)	比重=2.78、比表面積=3980cm ² /g
細骨材	S	君津産山砂	比重=2.60、粗粒率=2.58
粗骨材	G	Gmax=20mm碎石	比重=2.70、粗粒率=6.70、実積率=62.7%
混和剤	Sp	高性能AE減水剤[P×wt.%]	ポリカルボン酸エーテル系(と架橋ポリマーの複合体)
	Bp	分離低減剤[kg/m ³]	水不溶性多糖類β-1,3グルカン

3. 結果および考察

3.1 静的加圧実験

高性能AE減水剤の添加量を変えた3種類のコンクリート（C-1、C-2、C-3）において、加圧前（静置条件）のフレッシュコンクリートの特性とモルタルのレオロジー特性の経時変化を図-3に、加圧前後の各特性値の変化の様子を変化率として、図-4にそれぞれ示す。

(1) 流動特性の変化

図-3から、加圧前（静置条件）の経時変化を見ると、スランプフローは時間の経過とともに小さくなるが、高性能AE減水剤の添加量が多い配合ほどスランプフローの低下速度は小さい。

図-4から、加圧前後のスランプフローの関係をみると、加圧前のスランプフロー68cm以上では加圧による変化は殆どなく、加圧前62cm程度で15～20%程度、55cm程度で25%程度のロスが認められる。さらに、3配合の比較から、加圧前のスランプフローが62cm程度の場合、経過時間が長いものほど、加圧後のロスが大きくなる傾向が認められる。このように、加圧前のスランプフローが小さいものほど、または、経過時間が長いものほど、加圧によるスランプフローの低下は大きい傾向にあることが分かる。

(2) レオロジー特性の変化

図-3から、モルタルの塑性粘度ならびに降伏値は、時間の経過とともに大きくなるが、高性能AE減水剤の添加量が多い配合ほど、変化の大きくなる時期が遅れる傾向にある。

図-4から、塑性粘度は時間の経過によらず、加圧により全体的に増加する傾向にあり、加圧後には概ね1.1～1.2倍程度となる。一方、降伏値は時間の経過により、加圧後の降伏値の変化率が大きくなる傾向にある。但し、C-3については、静置状態の降伏値が時間的に変化しない練上りから90分の間は、加圧後の降伏値は加圧前よりも減少する傾向にある。この降伏値の変化は、高性能AE減水剤の添加量の違いにより生じ、セメント粒子に吸着する混和剤量が異なることによる影響と推察される。

(3) 流動特性とレオロジー特性の関係

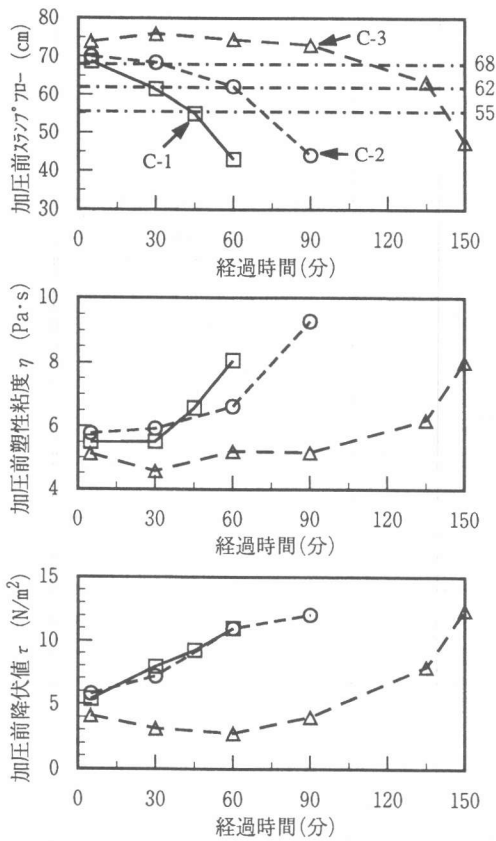


図-3 静置試料による経時変化特性

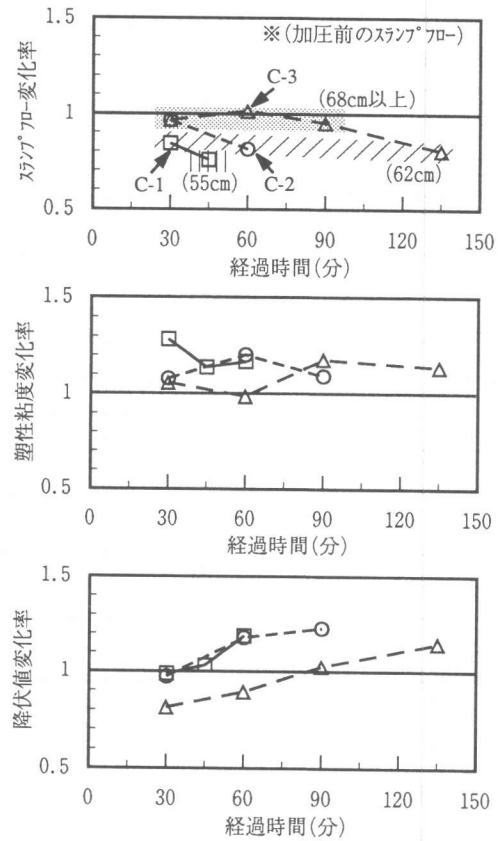


図-4 静的加圧による加圧前後の性状変化

図-4から、スランプフローとレオロジー特性の関係をみると、降伏値の変化率が1より大きい場合には、加圧後のスランプフローが減少する傾向が認められる。一方、加圧前後の降伏値の変化率が1より小さい場合には、加圧後のスランプフローの変化はほとんど認められないことから、加圧によりスランプフローが低下しない配合は、静置状態の降伏値が時間的に増加しない配合であると考えられる。

3.2 ポンプ圧送実験

(1) 管内圧力損失

吐出量の違いと管内圧力の関係を図-5に示す。図-5から求めた吐出量と管内圧力損失の関係を図-6に示す。ここで、管内圧力損失は配管実長より算出した。管内圧力損失は、吐出量が大いほど大きくなる傾向が認められる。これは、吐出量が大きくなり速度が早まることで、管内での摩擦抵抗が大きくなるためと考えられる。

同様に求めた、高性能AE減水剤の添加量ならびに圧送までの経過時間と管内圧力損失の各パラメータの関係を図-6に示す。図-6において、高性能AE減水剤の添加量が多い配合ほど管内圧力損失が小さくなる傾向が認められる。一方、圧送までの経過時間との関係では、経過時間が長いものほど管内圧力損失が若干大きくなる傾向が認められる。これらは、いずれもコンクリートの粘性が影響しているものと考えられ、添加量が少ないものほど、あるいは、経過時間が長いものほど、粘性が高くなるためと推察される。

(2) 吐出量と性状変化の関係

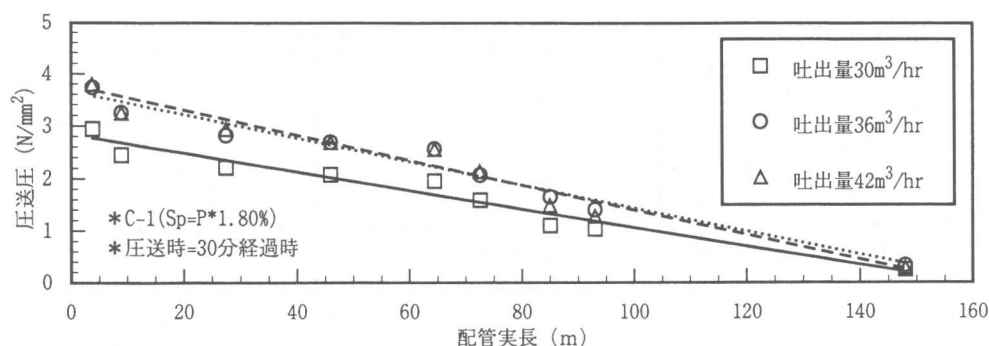


図-5 吐出量の違いと管内圧力の関係

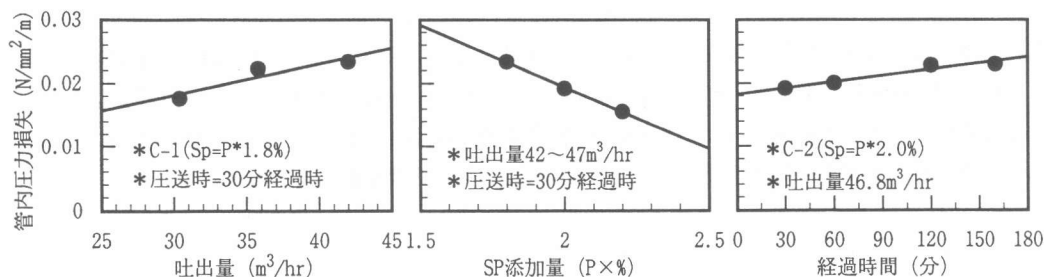


図-6 吐出量・高性能AE減水剤添加量・圧送までの経過時間と管内圧力損失の関係

吐出量、高性能AE減水剤の添加量、圧送までの経過時間の各パラメータと、圧送前後のスランプフローの変化、ならびに、レオロジー値の変化との関係を図-7に示す。

図-7から、吐出量の違いとスランプフローの変化についてみると、圧送にともないスランプフローは15～20%ロスするが、吐出量の違いによる差は明確には認められない。塑性粘度についても、吐出量の違いによる差は明らかではない。一方、降伏値については、吐出量が多くなるほど顕著に変化率が大きくなる傾向にある。今回の結果では、吐出量が多くなるほど、降伏値は明確に増大しているものの、スランプフローのロスには必ずしも対応していない。これについては、今後室内実験等により、詳細に検討していく必要がある。

(3) 高性能AE減水剤の添加量と性状変化の関係

図-7を見ると、高性能AE減水剤の添加量が多い配合ほど、圧送によるスランプフローのロスは小さく、圧送後の降伏値、塑性粘度の増加率は低下している。これは、高性能AE減水剤の添加量が多いものほど、セメント粒子表面に吸着して、あるいは、液相中でセメント粒子と干渉する混和剤の量が多くなることにより生じる現象であると推察される。

(4) 圧送経過時間と性状変化との関係

圧送までの試料の経過時間の影響では、時間の経過とともに圧送前後の塑性粘度、降伏値の変化率が次第に大きくなっており、これが、スランプフローのロスに顕著に現われたものと考えられる。また、室内実験の結果と同様に、圧送前後の降伏値が変化していない30分時点では、スランプフローはロスしていない。このことから、スランプフローのロスは、主に降伏値の増加に起因するものと考えられる。このような経過時間によるスランプフローの低下率の増加は、主に時間の経過に伴う分散効果の減少によるものであり、高性能AE減水剤の添加量が少なくなることと同様の作用と考えられる。

以上のように、高流動コンクリートにおける室内の静的加圧による性状変化とポンプ圧送による性状

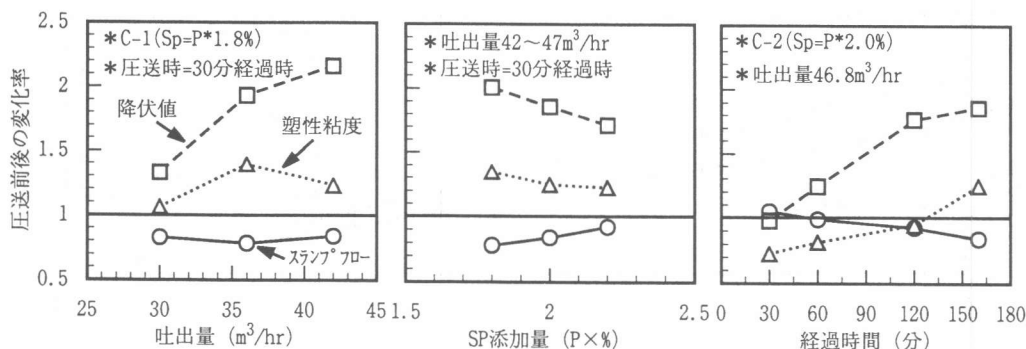


図-7 吐出力・高性能AE減水剤添加量・圧送までの経過時間とフレッシュ性状変化率の関係

変化の関係とは、同様の傾向が得られた。ポンプ圧送時には、加圧作用以外にせん断作用も影響すると考えられるが、本実験結果から、ポンプ圧送によるスランプフローの変化は、主に加圧作用により生じるものと考えられる。今後は、ポンプ圧送時の流動性の低下を小さく抑えるために、降伏値の上限を定量化し、高性能AE減水剤の種類の影響についても明らかにする必要があると考える。

4. まとめ

本研究では、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた高流動コンクリートについて、高性能AE減水剤の添加量を調整して、スランプフロー値を60～75cmで3水準に変化させた配合について、室内の静的加圧による模擬実験とポンプ圧送実験により、高流動コンクリートのポンプ圧送時のスランプフローならびに塑性粘度・降伏値の変化特性を検討したものである。以下に、本実験により、得られた知見をまとめる。

- (1) 室内の静的加圧において、加圧前のスランプフロー68cm以上では、加圧後のスランプフローの変化はほとんどなく、加圧前のスランプフローが小さくなるに連れて、加圧後のスランプフローのロスが大きくなる。このとき、加圧前後の塑性粘度はほぼ一様に1.1～1.2倍に増加するが、降伏値の変化率は時間の経過とともに増加する傾向にある。
- (2) ポンプ圧送において、高性能AE減水剤の添加量が少ない配合ほど、また、圧送までの経過時間が長いものほど、圧送後の降伏値の増加率がとりわけ大きくなり、スランプフローのロスが大きくなる。
- (3) 高流動コンクリートの室内の静的加圧による加圧前後の変化とポンプ圧送による変化とは、傾向が一致しており、ポンプ圧送によるスランプフローの変化は、主に加圧作用により生じるものと考えられる。

参考文献

- [1] 大友 健ほか：高流動コンクリートのポンプ圧送による品質の変化に関する研究、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.109-114、1993
- [2] 新藤竹文ほか：高流動コンクリートの自己充填性とモルタルのレオロジー特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集Vol.18、No.1、pp.99-104、1996
- [3] Somunuk TANGTERMSILIKUL et al. : A STUDY ON WORKABILITY LOSS DUE TO PUMPING OF SUPER WORKABLE CONCRETE、土木学会第47回年次学術講演会、pp.324-325、1992