

論文 ポンプ圧送によるフレッシュコンクリートの流動性の変化に関する研究

浦野真次*1・名倉健二*2・栗田守朗*3・田中博一*4

要旨:本研究は、現場において圧送距離を3段階に変化させたポンプ圧送実験を行い、温度が14～24℃のコンクリートを用いて、コンクリートの流動性の変化に関する検討を行った。ウエットスクリーニングしたモルタルの流動性および微粒分の粒度分布等の観点から考察した結果、コンクリート温度によっては微粒分の凝集という観点だけでは説明できず流動性の変化に異なるメカニズムが関与している可能性があることを示した。

キーワード:ポンプ圧送, 流動性, 長距離圧送, 凝集, 粒度分布

1. はじめに

コンクリートを長距離のポンプ圧送を行って施工する場合には、圧送性に優れ、配管筒先での要求品質を確保した上で、経済性を考慮したコンクリートの配合を選定しなければならない。しかし、圧送距離や圧送時間など様々に変化する施工条件に応じて、長距離圧送によるコンクリートの性状変化¹⁾、特に流動性の変化を定量的に評価する手法がないため、試行錯誤によって配合選定しているのが現状である。最近では、高流動コンクリートに関して、主として高性能AE減水剤の効果の相違により、ポンプ圧送に伴いスランプフローが低下する、あるいは逆に増大する事例が報告されており²⁾、配管筒先での流動性の管理をより難しいものとしている。

時間経過に伴うスランプの低下のメカニズムとしては、水和反応などの化学的要因と機械的かくはんエネルギーなどの物理的要因の両方が作用していると考えられている^{3), 4)}。特に、化学的要因に関して内川は、セメント粒子の水和反応の進行に伴い生成した水和物が凝集構造を形成するためとしている⁴⁾。さらに、高性能AE減水剤を添加したセメントペースト、およびモルタルなどの経時変化に関しても新しい知見が

得られている^{5), 6)}。圧送中のコンクリートには、通常の時間経過の他に、圧送圧力およびテーパー管やベント管における強制的なせん断力等が作用しており、化学的要因あるいは物理的要因それぞれに影響を及ぼし、より複雑なメカニズムとなっているものと考えられる。

著者らは、最大800mを越えるポンプ圧送実験を行い、圧送距離を4段階に変化させたコンクリートについて、圧送によるスランプの低下に関する検討を試み、既にこれを報告した⁷⁾。その中で、圧送による流動性低下の原因として、コンクリートの流動性の変化には時間経過だけではなく圧送による微粒子の凝集も影響することを示した。しかし、実験に用いたコンクリートの温度が30℃程度の比較的高い温度で行ったことなど、非常に限られた範囲内での検討であった。本研究は、ポンプ圧送におけるコンクリートの性状変化に関するメカニズム解明のための基礎データをさらに蓄積することを目的として、コンクリート温度が14～24℃のコンクリートを用いて、ポンプ圧送実験を行ったものである。圧送距離は3段階に変化させ、圧送されたコンクリートをウエットスクリーニングしたモルタルの流動性状についても検討を行った。

*1 清水建設(株) 土木本部技術第一部 工博(正会員)

*2 清水建設(株) 土木本部技術第一部グループ長(正会員)

*3 清水建設(株) 技術研究所 土木研究開発部 工修(正会員)

*4 清水建設(株) 技術研究所 土木研究開発部 工修(正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料および配合をそれぞれ表一および表二に示す。実験は、11月上旬から12月下旬に行い、コンクリートは表二に示す前報⁷⁾と同一の配合を用いた。目標スランプは、流動化前21cm、流動化後24cmとし、流動化剤を0.8l/m³現場にて添加した。なお、プラントから実験場所までのコンクリート運搬時間は10分程度であった。

2.2 圧送条件および試料採取位置

ポンプの配管状況および圧送後のコンクリートの試料採取位置を図一に示す。圧送距離は、配管実長で地上部20.0m、立坑部22.0mで一定とし、トンネル内水平部を225、380、570mの3個所に変化させた（以下、簡単のため試料採取位置であるトンネル内水平部の距離を圧送距離と称す）。コンクリートの圧送には125A(5B)管を使用した。圧送速度は、圧送距離の異なる3回とも、20m³/h程度を目標にした。圧送前試料は、ポンプ投入前にアジテータ車から採取し、圧送後の試料は、配管筒先から採取した。

2.3 実験方法

流動化後（圧送前）の試料および配管筒先から採取した圧送後の試料のコンクリートについて、以下に示す測定を実施した。さらに、性状変化が圧送中に作用する圧力等によるものか、圧送中の経時変化によるものかを比較検討するため、圧送後の試料と同時刻に、圧送前に採取した試料を静置した試料についても試験を行った。このときいずれの試料も練り舟で約30秒練り直して試験を行った。

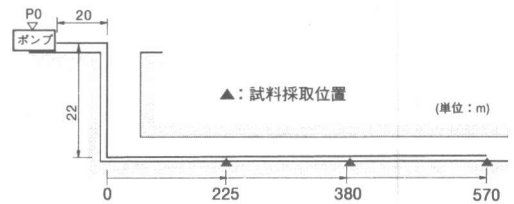
- (1)ポンプの圧力測定：定常的な圧送状態におけるポンプのピストン前面圧を測定した。
- (2)フレッシュコンクリートの性状に関する試験：スランプ、スランプフロー、空気量、温度の4項目について測定を行った。
- (3)ウエットスクリーニングしたモルタルの流動性に関する試験：採取したコンクリート試料を5mmふるいによりウエットスクリーニングし、

表一 使用材料

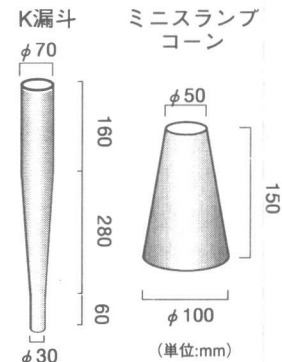
材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³
細骨材	山砂 表乾密度: 2.60g/cm ³ FM: 2.60
粗骨材	石灰砕石 表乾密度: 2.69g/cm ³ 実積率: 60.0
混和剤	AE減水剤（リグニン系） 流動化剤（ナフタレン系）

表二 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m ³)				混和剤	
		W	C	S	G	AE減水剤	流動化剤
53.1	48.6	187	352	830	910	CX0.25%	0.8 (l/m ³)



図一 配管状況および試料採取位置



図二 K漏斗・ミニスランプコーンの形状

図二に示すK漏斗流下時間およびミニスランプコーンによるモルタルフローの測定を行った。(4)微粒分の粒度分布：上述のウエットスクリーニングしたモルタルをアセトン中で10分間かくはんして十分に水和を停止させ、微粒分の粒度分布を測定した。粒度分布の測定は、レーザー回折式粒度分布測定装置を用い、エタノールを溶媒とした懸濁液として行った。測定範囲は、36.1 μm以下で行った。粒度分布測定に供する微粒分は、アセトン中の試料を十分にかくはんし、その懸濁液を直ちにビーカーに採取してかくはんしているものから採取した。このため、著しく沈降の速い粗大粒子は測定には含まれて

表-3 吐出量および
圧送圧測定結果

圧送距離(m)	225	380	570
吐出量(m ³ /h)	25.0	16.0	17.1
ピストン前面圧(N/mm ²)	2.13	2.44	3.11

表-4 空気量および温度測定結果

圧送距離(m)	225 (外気温8℃)		380 (外気温13℃)		570 (外気温19℃)	
	空気量(%)	温度(℃)	空気量(%)	温度(℃)	空気量(%)	温度(℃)
圧送前	5.5	14.0	3.6	17.0	4.3	24.0
圧送後	5.2	16.0	3.5	19.5	3.8	24.0
静置	5.0	12.0	3.3	15.0	4.0	22.0

表-5 スランプおよびスランプフロー試験結果

圧送距離(m)	225		380		570	
経過時間(分)	25		43		60	
単位:(cm)	スランプ	スランプフロー	スランプ	スランプフロー	スランプ	スランプフロー
圧送前	24.5	43.5	24.0	49.0	23.5	42.5
圧送後	23.5	45.0	24.0	40.0	23.0	43.0
静置	23.5	42.0	22.0	39.5	22.0	38.0

いない。

(5)混和剤の吸着量の測定:ウエットスクリーニングしたモルタルを遠心分離器を用いて脱水させ、脱水溶液の全有機体炭素分析を行いAE減水剤と流動化剤のトータルの吸着量を算定した。

3. 実験結果および考察

3.1 吐出量とピストン前面圧

コンクリートの実吐出量とポンプのピストン前面圧の測定の結果を、表-3に示す。ポンプの実吐出量は、アジテータ車1台分のコンクリートを圧送するのに要した時間から算出した。ピストン前面圧は、ポンプの主油圧から算定した。

吐出量が一定ではないものの、圧送距離が長いほど、ピストン前面圧が大きくなった。従って、圧送距離が長いほど、大きな圧力履歴を受けると考えられる。

3.2 圧送によるコンクリートの性状変化

表-4に、コンクリートの圧送前後および静置試料の空気量および温度を示す。空気量に関しては、若干減少する傾向となった。コンクリート温度は、圧送前の温度と比較して、圧送後試料は同程度もしくは約2℃上昇し、静置試料は2℃程度低下した。これは、圧送後試料は、20℃程度で安定しているトンネル内を移動したこと、および静置試料は、外気温が表-4に示すように圧送前コンクリート温度より低い地上

部に静置されたために周辺の温度に影響されたことが原因であると考えられる。

コンクリートの圧送前後および静置試料のスランプおよびスランプフローを表-5に示す。経過時間は、コンクリート投入開始から配管筒先にコンクリートが排出されるまでの時間である。なお、長距離圧送であるためアジテータ車1台の投入量ではコンクリートが排出されないことから、アジテータ車の入れ替えの時間も含まれている。いずれの圧送距離の試料においても、圧送前と比較してスランプおよびスランプフローは同程度もしくは低下した。しかし、圧送前の試料と比較して静置試料のスランプおよびスランプフローが圧送後より低下する傾向となった。

圧送前のスランプからの圧送後および静置試料のスランプの低下量と圧送距離の関係を図-3に示す。圧送前のコンクリートの温度が圧送距離225mと570mでは10℃程度も異なるために直接は比較できないものの、スランプの低下量は、圧送距離との関連性が認められない。さらに、既に述べたように圧送後より静置試料のスランプ低下量が大きくなる傾向となった。この結果は、図-4に示す前報⁷⁾の結果と相反する傾向である。また、静置試料のスランプの低下量に関しては前報の結果と大きく相違していない。したがって、コンクリート温度などの諸条件によっては、圧送圧力や強制的なせん断力等

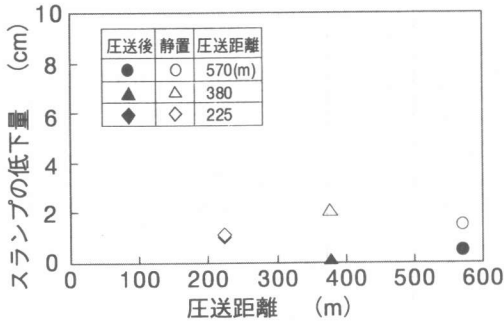


図-3 圧送距離とスランプの低下量の関係

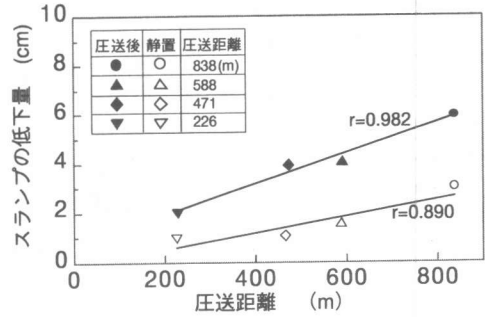


図-4 圧送距離とスランプの低下量の関係
(コンクリート温度 30℃程度)⁷⁾

表-6 モルタルのK漏斗およびミニスランプフロー試験結果

項目	225		380		570	
	K漏斗流下時間(s)	ミニスランプ*フロー(mm)	K漏斗流下時間(s)	ミニスランプ*フロー(mm)	K漏斗流下時間(s)	ミニスランプ*フロー(mm)
圧送前	3.14	225	3.07	220	2.60	235
圧送後	2.42	220	2.12	220	2.22	210
静置	3.51	215	3.76	195	2.93	210

が作用しても、必ずしもスランプの低下量が増大するわけではないことが示唆された。

3.3 圧送によるウエットスクリーニングモルタルの流動性の変化

採取したコンクリート試料をウエットスクリーニングしたモルタル（以下、単にモルタルと称す）について、K漏斗流下時間およびミニスランプコーンによるモルタルフローの測定を行い、流動性の変化の検討を試みた。ここで、K漏斗流下時間は粘性の指標とした⁸⁾。

モルタルの圧送前後および静置試料のK漏斗流下時間およびミニスランプフローを表-6に示す。K漏斗流下時間は、いずれの圧送距離においても圧送後試料が最も短く、ミニスランプフローは静置試料が最も小さい結果となった。表-5に示したスランプおよびスランプフローは、これらのモルタルの性状に影響を受けていると考えられる。

ここで、高性能AE減水剤を添加したモルタルにおいて大内らによって提案されている相対フロー面積比 (Γm) と相対ロート速度比 (Rm) の関係による流動性の評価手法^{5), 9)} を応用し、本実験における圧送前後および静置試料のモル

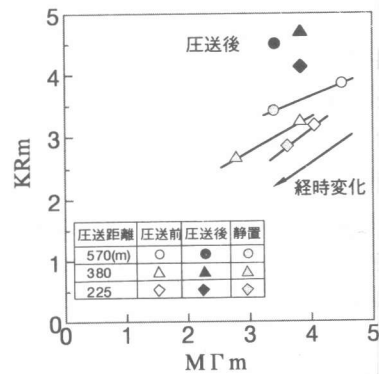


図-5 $M \Gamma m$ と KRm の関係

タルの流動性の評価を試みた。流動性の高い領域においては、混和剤が異なっても評価手法が適用できると仮定し、大内らの示すフローおよびロート流下時間が、それぞれミニスランプコーンによるモルタルフローおよびK漏斗流下時間で表現できると仮定した。ミニスランプフローによる相対フロー面積比を $M \Gamma m$ 、K漏斗による相対ロート速度比を KRm とそれぞれ表記し、以下の式を用いて算出した。

$$M \Gamma m = (F^2 - F_0^2) / F_0^2 \quad (1)$$

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

ただし、F：ミニスランプフロー(mm)

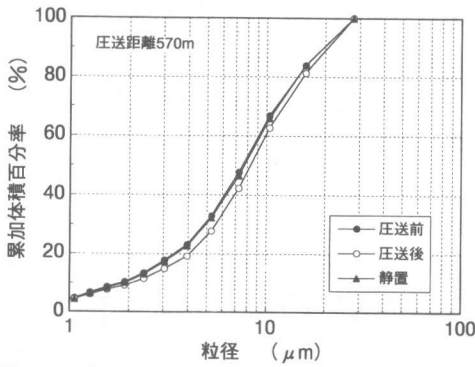


図-6 粒度分布測定結果 (圧送距離 570m)

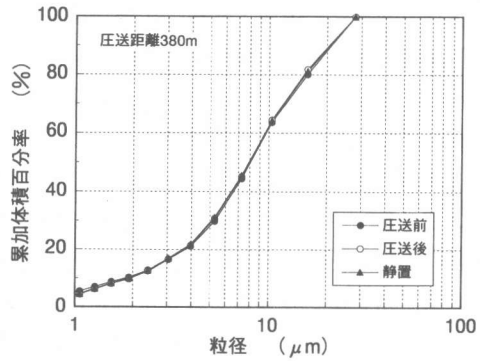


図-7 粒度分布測定結果 (圧送距離 380m)

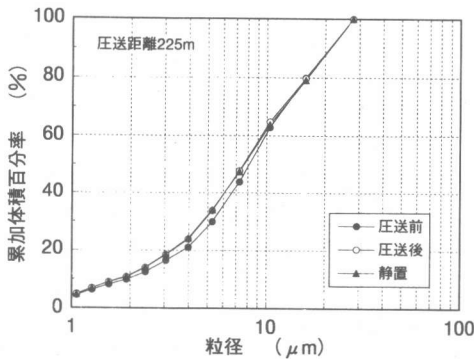


図-8 粒度分布測定結果 (圧送距離 225m)

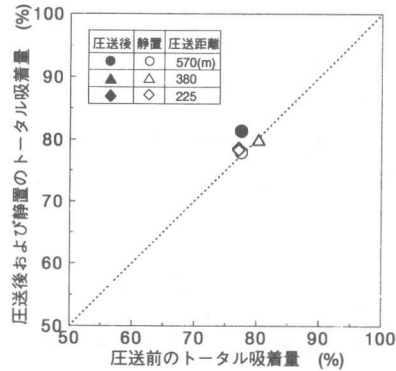


図-9 圧送後および静置による混和剤吸着量の変化

F_0 : ミスランプコーンの底面の直径 (100mm)

t : K 漏斗流下時間 (s)

これによって計算された相対フロー面積比 $M \Gamma m$ と相対ロート速度比 KRm の関係を図-5 に示す。値自体は大内らの示した相対フロー面積比と相対ロート速度比⁹⁾ と関係ないが、相対フロー面積比が大きいほどフローが大きく、相対ロート速度比が大きいほど低粘性であることは同義である。図に示されるように、静置試料は、圧送前試料よりも $M \Gamma m$, KRm とともに減少した。この傾向は、菅原らの結果⁵⁾ と一致する。菅原らは、流動性の低下の原因は時間の経過とともに主としてエトリンガイトの生成による凝集エネルギーの増加によるためと考察している。一方、圧送後試料に関して、 KRm が増加して低粘性となり、同一の配合であるにもかかわらず静置試料とは異なる傾向となった。これは、流動性の変化に異なるメカニズムが関与してい

るためと推測される。

3.4 微粒分の粒度分布および混和剤吸着量

図-6～図-8 に各圧送距離のフレッシュコンクリート中の微粒分の粒度分布を示す。測定は超音波をかけない条件^{7), 10)} の基で行った。圧送あるいは時間経過により微粒分の凝集があれば、圧送後試料および静置試料のいずれかが粒径の大きい側にシフトする傾向となる⁷⁾ ものと考えられる。しかしながら、これらの図からいずれの圧送距離においても、粒度分布はほとんど変化していないことが分かる。したがって、粒子が凝集して見かけ上粗粒子となる現象が生じていないこととなる。圧送後試料のスランプの低下量が比較的小さいのは、微粒分の凝集がほとんど発生していないことも一つの要因であると推定される。流動性の低下が比較的大きかった静置試料についても、粒度分布では凝集の傾向は認められなかった。

また、図-9に示すように、圧送前後および静置試料におけるAE減水剤と流動化剤のトータル吸着量の著しい変化は認められず、モルタルの流動性の変化との関連性も不明である。

以上のことから、コンクリート温度が14、17および24℃である本実験条件では、微粒分の凝集という観点だけではその流動性の変化を説明できず、30℃程度の場合と異なる流動性変化のメカニズムが関与している可能性がある。今後は、より詳細な流動性変化のメカニズム解明のため、圧送距離、経過時間およびコンクリート温度が変化した場合のセメント粒子のエトリング生成量、表面電位による静電反発力の変化¹¹⁾、および液相中の硫酸イオンの濃度⁶⁾等が流動性変化に及ぼす影響について検討を行う必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究は、現場において圧送距離を3段階に変化させたポンプ圧送実験を行い、温度が14～24℃のコンクリートについて、流動性の変化に関する検討を行った。その結果、本研究の範囲内で、以下のことが言える。

- (1)スランプの低下量は、圧送距離との関連性が認められず、圧送後より静置試料のスランプ低下量が大きくなる傾向となった。
- (2)採取したコンクリート試料をウェットスクリーニングしたモルタルのK漏斗流下時間は、いずれの圧送距離においても圧送後試料が最も短く、ミニスランプフローは静置試料が最も小さい結果となった。
- (3)静置試料は、圧送前試料よりも相対フロー面積比および相対ロート速度比ともに減少し、圧送後試料は、相対ロート速度比が増加して低粘性となった。
- (4)いずれの圧送距離においても、微粒分の粒度分布はほとんど変化しておらず、粒子が凝集して見かけ上粗粒子となる現象が生じていないと考えられる。混和剤の吸着量の著しい変化は認められない。

(5)コンクリート温度によっては、コンクリートの流動性の低下は微粒分の凝集という観点だけでは説明できず、流動性の変化に異なるメカニズムが関与している可能性がある。

謝辞

混和剤の吸着量の測定には、花王(株)和歌山研究所の皆様の協力を得た。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1)土木学会編:コンクリートのポンプ施工指針[平成12年版], pp.52-75, 2000.2
- 2)土木学会編:高流動コンクリート施工指針, pp.140-141, 1998.7
- 3)岡田英三郎:スランプロス・流動化コンクリートの応用,セメント協会編セメント・コンクリート化学とその応用, pp.141-147, 1987.8
- 4)内川浩:高強度コンクリートの材料設計,石膏と石灰, No.242, pp.2-15, 1993.11
- 5)菅俣匠, 日比野誠, 大内雅博, 岡村甫:ポリカルボン酸系高性能AE減水剤の粒子分散作用に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No.2, pp.91-96, 1999.6
- 6)加藤弘義, 吉岡一弘, 牛山宏隆:ポリカルボン酸系高性能AE減水剤の作用機構に及ぼす硫酸イオンの影響, セメント・コンクリート, No.634, pp.48-54, 1999.12
- 7)浦野真次, 熊野知司, 名倉健二, 河井徹:ポンプ圧送によるフレッシュコンクリートの性状変化に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.343-348, 1999.6
- 8)河井徹, 橋田浩:高流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.125-130, 1994.6
- 9)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AE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.20, No.2, pp.355-360, 1998.6
- 10)粉体工学会編, 粒子径計測技術, 日刊工業新聞社, pp.49-67, 1994.11
- 11)名和豊春, 大久保正弘, 江口仁:高性能AE減水剤を添加したモルタルおよびセメントペーストの流動性に及ぼす温度の影響, 第45回セメント技術大会講演集, pp.116-121, 1991.5