

# 論文 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検討

浦野真次\*1・熊野知司\*2・名倉健二\*3・河井 徹\*4

**要旨:**本研究は、現場において最大800mを超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、圧送距離がコンクリート中の微粒分の粒度分布や混和剤の吸着量に及ぼす影響について検討し、長距離圧送時のコンクリートの性状変化のメカニズムについて考察したものである。その結果、流動性の低下には時間経過だけではなく、圧送により微粒子が凝集することも影響することが確認された。

**キーワード:**ポンプ圧送, 性状変化, 長距離圧送, 粒度分布, 混和剤吸着量

## 1. はじめに

近年、施工の多様化および施工条件の制約等から、かなりの長距離におよぶポンプ圧送を行う必要のある事例が増加している<sup>1)</sup>。長距離圧送を行う場合には、圧送性を考慮するあまり、選定した配合が不経済となる場合も多い。一方、ポンプ圧送により、スランプをはじめとするコンクリートの性状が変化することが知られており、特に、長距離圧送を行う場合には、変化の程度が大きくなる傾向を示す<sup>2)</sup>。したがって、配管筒先でのコンクリートのフレッシュ性状が要求品質を満足するように、この性状変化の程度を予測して、経済的な配合を選定する必要がある。しかしながら、圧送距離や圧送時間に応じて、圧送による性状変化の程度を事前に定量的に評価する手法はないのが現状である。

一般的な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<sup>3)</sup>。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、これらが性状変化に大きく関係し、より複雑なメカニズムとなっているものと考え

られる。

ポンプ圧送におけるコンクリートの性状変化のメカニズムを解明するため、これまで主として高流動コンクリートを対象として、圧送圧力を模擬した静的加圧試験<sup>4)</sup>やせん断変形を模擬した再練混ぜ試験<sup>5)</sup>が試みられている。また、ポンプ圧送が高流動コンクリート中の微粒分の状態や混和剤の吸着性状に及ぼす影響についての考察がなされている<sup>6)</sup>。しかし、いずれの研究においても、圧送距離や圧送時間と性状変化のメカニズムとの関係については検討されていない。

本研究は、現場において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、主として圧送距離がコンクリート中の微粒分の粒度分布や混和剤の吸着量に及ぼす影響について検討し、長距離圧送時のコンクリートの性状変化のメカニズムについて考察を行ったものである。

## 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-1および表-2に示す。実験は、6月上旬から9月下旬に行い、最も圧送距離が長い場合に圧送可能な

\*1 清水建設(株) 技術研究所 土木研究開発部 工修(正会員)

\*2 清水建設(株) 土木本部技術第一部 工博(正会員)

\*3 清水建設(株) 土木本部技術第一部グループ長(正会員)

\*4 清水建設(株) 土木本部技術第一部副部長 工博(正会員)

コンクリートとするため、これまでの圧送実績を参考にして配合の選定を行った。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/m<sup>3</sup> 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-1に示す。圧送距離は、配管実長で地上部 20.0m、立坑部 11.6m で一定とし、トンネル内水平部を 838, 588, 471, 226m の 4 個所に変化させた（以下、トンネル内水平部の距離を単に圧送距離と称す）。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 4 回とも、25m<sup>3</sup>/h 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やせん断力によるものか、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)微粒分の粒度分布：採取したコンクリート試料を 5mmふるいによりウェットスクリーニングし、これをアセトン中で 10 分間かくはんして水和を停止させ、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、135 μm 以下で行っ

表-1 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 <sup>3</sup>
細骨材	山砂 表乾密度: 2.60g/cm <sup>3</sup> FM: 2.60
粗骨材	石灰砕石 表乾密度: 2.69g/cm <sup>3</sup> 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-2 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )				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 <sup>3</sup> )

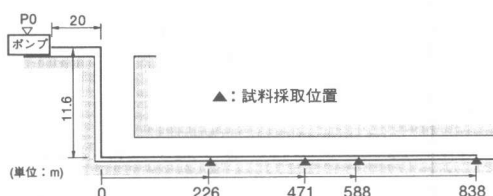


図-1 配管状況および試料採取位置

表-3 吐出量および圧送圧測定結果

圧送距離(m)	226	471	588	838
吐出量(m <sup>3</sup> /h)	28.3	25.0	25.4	22.8
ピストン前面圧 (N/mm <sup>2</sup> )	1.37	2.84	3.38	3.34

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いない。

- (4)混和剤の吸着量の測定：上述のウェ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 吐出量とピストン全面圧

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 (5m<sup>3</sup>) を圧送するのに要した時間から算

表-4 スランプおよびスランプフロー試験結果

圧送距離(m)	226		471		588		838	
経過時間(分)	25		41		38		48	
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	スランプ	スランプフロー
流動化前	19.5	34.0	20.5	36.0	21.0	35.0	20.5	36.0
流動化後	23.0	44.5	23.5	46.0	25.0	52.0	25.0	48.5
圧送後	21.0	35.0	19.5	32.0	21.0	34.0	19.0	37.5
静置	22.0	40.5	22.5	40.0	23.5	47.0	22.0	39.5

表-5 空気量および温度測定結果

圧送距離(m)	226		471		588		838	
	空気量(%)	温度(℃)	空気量(%)	温度(℃)	空気量(%)	温度(℃)	空気量(%)	温度(℃)
流動化前	4.5	29.0	4.5	34.0	4.6	28.5	4.0	30.0
流動化後	4.9	29.0	4.6	34.0	4.3	30.0	3.9	29.5
圧送後	5.0	29.5	3.6	32.0	4.9	29.0	3.1	30.0
静置	4.8	28.0	4.2	33.5	4.3	28.0	3.5	29.0

出した。ピストン前面圧は、ポンプの主ポンプ圧から算定した。

圧送距離が長いほど、概ねピストン前面圧が大きくなった。従って、吐出量が一定の場合には、圧送距離が長いほど、大きな圧力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

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-4に示す。表には流動化前の試験結果も示す。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んでいる。いずれの圧送距離の試料においても、スランプおよびスランプフローは低下した。また、圧送前の試料を静置した試料と比較して、圧送後の試料のスランプおよびスランプフローの低下量が大きくなる結果となった。

表-5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。空気量は、一般的にポンプ圧送によって低下することが報告されている<sup>1)2)</sup>が、本実験では圧送前後において空気量の増減に関して明確な傾向は得られなかった。コンクリート温度についても、トンネル内という比較的一定の温度の環境下で直射

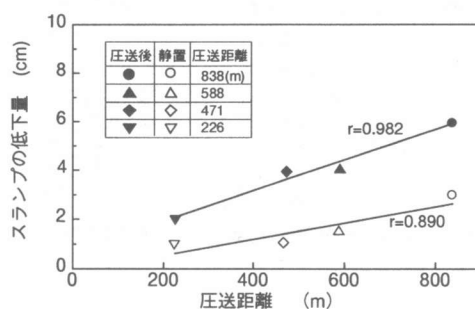


図-2 圧送距離とスランプの低下量の関係

日光も当たらないという圧送条件下では、圧送前後では大きな温度上昇はなく、ほとんど変化していなかった。

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-2に示す。圧送距離が長いほど、スランプの低下量が大きくなり、圧送距離226mで2cm、圧送距離838mで6cm低下した。静置試料についても、圧送距離が長くなるほど、経過時間すなわち静置時間も長くなるため、スランプの低下量は大きくなった。しかし、静置試料の場合には、圧送距離226mで1cm、圧送距離838mで3cm程度の低下であった。したがって、圧送後と静置試料とのスランプの低下量の差は、圧送距離が長くなるほど大きくなった。ただし、圧送距離471mに関しては、物性に影響を与えられと考えられるコンクリート温度が他の圧送距離よりも5℃程度大

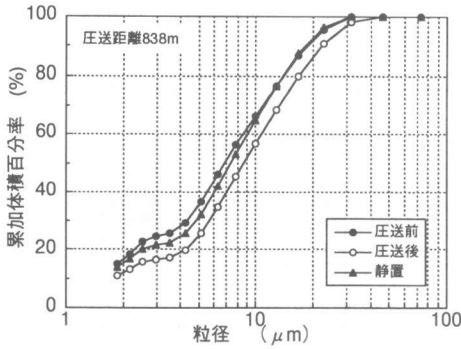


図-3 粒度分布測定結果 (圧送距離 838m)

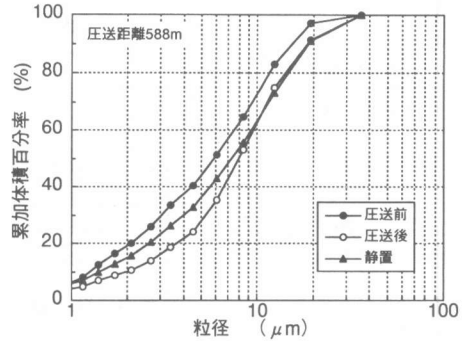


図-4 粒度分布測定結果 (圧送距離 588m)

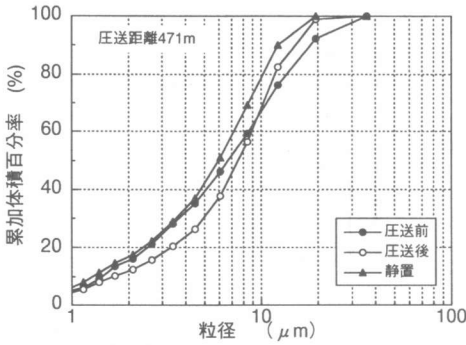


図-5 粒度分布測定結果 (圧送距離 471m)

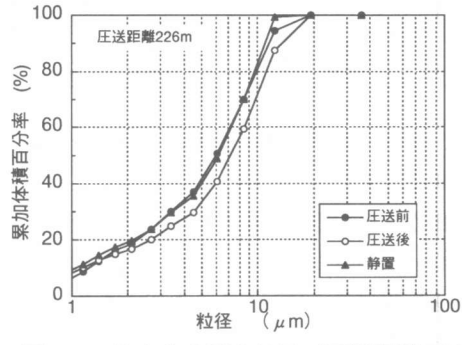


図-6 粒度分布測定結果 (圧送距離 226m)

大きく、スランプの低下量を一義的に圧送距離と関連付けて評価することはできない。しかしながら、仮に圧送距離471mのデータを除いた場合でも、図-2において圧送距離が長いほどスランプの低下量が大きくなるという傾向は変わらない。したがって、コンクリート温度がほぼ同一の場合、スランプの低下は、時間経過だけではなく、圧送距離にも影響されることが確認された。

### 3.3 微粒分の粒度分布および混和剤吸着量

図-3～図-6にフレッシュコンクリート中の微粒分の粒度分布を示す。これらの図から、いずれの圧送距離においても、静置試料と圧送後試料を比較すると、圧送後の試料の方が粒径の大きい側にシフトしていることがわかる。これらの図から、粒度分布の特性値の一つである体積平均径 ( $D_{50}$ : 体積百分率50%に対する粒径) を求め、図-7に示した。圧送後の試料は、圧送前試料や静置試料に対して体積平均径が大きくなった。この傾向は、配合や圧送条件が異なる

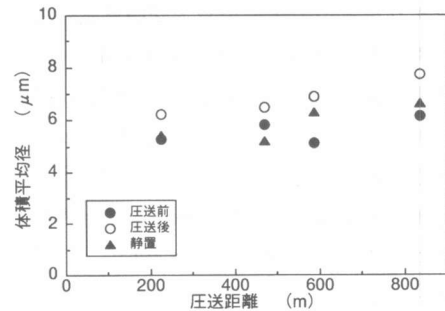


図-7 各試料における体積平均径

ために直接は比較できないものの、圧送により粒子が破碎されると考察した既往の研究<sup>6)</sup>とは相反する傾向となった。

圧送により粒度分布が大きくなる理由としては、粒子が衝突等により凝集して見かけ上粗粒子となる場合と、粒子自身が初期の水和により成長する場合が考えられる。そこで、以下に詳細な検討を行った。

微粒分の粒度分布測定に際し、懸濁液を入れたビーカーを超音波バスにかけて測定した。超

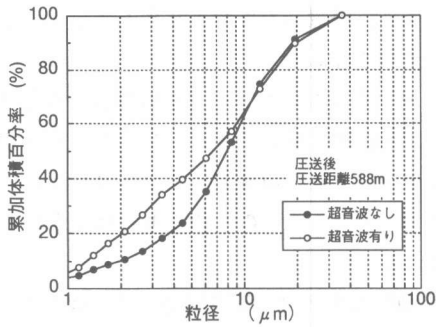


図-8 超音波の有無による粒度分布測定結果 (圧送後)

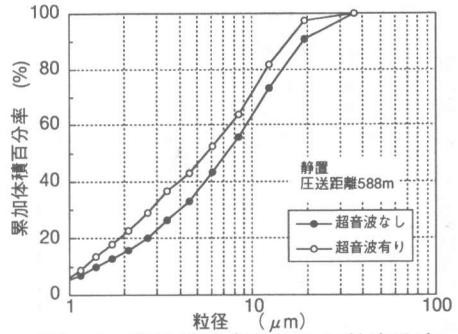


図-9 超音波の有無による粒度分布測定結果 (静置)

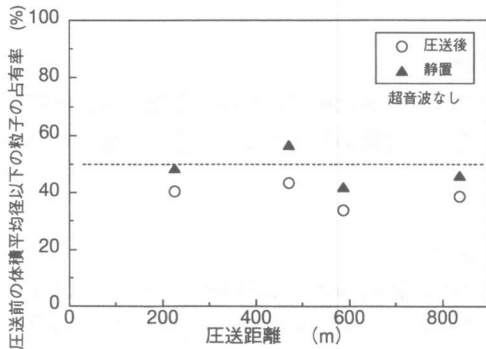


図-10 圧送前試料の体積平均径以下の粒子の占有率 (超音波なし)

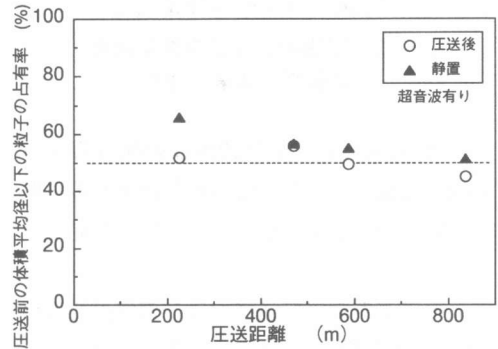


図-11 圧送前試料の体積平均径以下の粒子の占有率 (超音波有り)

音波バスは、凝集体を分散させる方法として一般的に用いられている。使用した超音波バスの仕様は出力 35W、周波数 47kHz であり、今回測定しているミクロンオーダーの試料は 3 分以上照射することで十分凝集粒子を分散するものと判断した<sup>7)</sup>。図-8 および図-9 に圧送後および静置試料に対して、超音波有りの場合となしの場合での粒度分布測定結果の比較例を示す。これらの図より、いずれの場合も超音波をかけることにより、微粒子側にシフトする傾向が認められた。

圧送前の試料の体積平均径を基準として、圧送後および静置試料の圧送前平均径以下の粒子の占有率について、超音波のない場合と有る場合をそれぞれ図-10 および図-11 に示す。各図において、圧送前の平均径以下の粒子の占有率が 50% 未満の場合には、圧送前と比較して粒径の大きい側にシフトしていることを意味する。

超音波がない場合、図-10 に示すように、ば

らつきはあるものの圧送後試料および静置試料では圧送前の体積平均径以下の粒子の占有率は 50% 未満となる傾向であり、圧送前試料よりも粒径が大きいほうにシフトしている。また、この程度は圧送後試料の方が静置試料よりも大きい。一方、図-11 に示すように、超音波をかけることにより、圧送後試料および静置試料ともに圧送前の体積平均径以下の粒子の占有率は 50% に近づき圧送前の体積平均径とほぼ同程度に戻る傾向にある。これらのことより、圧送後試料および静置試料の粒径の粗粒子側へのシフトは、水和の成長を無視すれば微粒子の凝集によるものと考えられる。

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の吸着量の測定結果を図-12 に示す。混和剤の吸着量は、圧送前後および静置試料でほとんど変化しなかった。混和剤の吸着量が圧送前後でほとんど変化しないとい

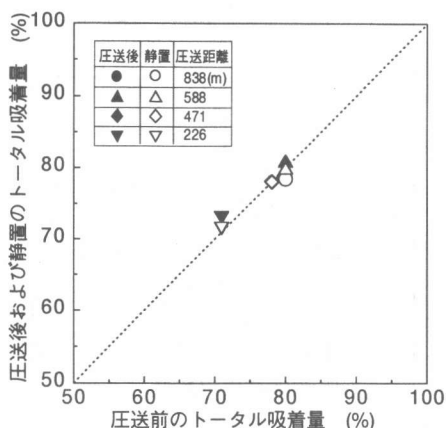


図-12 圧送後および静置による  
混和剤吸着量の変化

うことは、練混ぜからの時間が最大60分程度の本実験の範囲では、この間の水和がほとんど進行していないことを示しているものと推定される<sup>8)</sup>。

以上のことから、圧送後および静置試料の粒径が圧送前の試料に比べて粗粒子側へシフトするという現象は、水和の進行よりむしろ微粒子の凝集によるものと考えられる。さらに、その凝集の程度は静置試料よりも圧送後試料の方が大きいことから、圧送によりコンクリート中の微粒子の凝集が促進されていると考えられ、これが圧送によるコンクリートの流動性の低下の主要なメカニズムになっていると考えられる<sup>3),9)</sup>。圧送による微粒子の凝集の増大は、圧送中に作用するせん断力や圧送圧に起因するものと考えられるが、現在のところ明確ではない。

#### 4. まとめ

本研究は、現場において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、主として圧送距離がコンクリート中の微粒子の粒度分布や混和剤の吸着量に及ぼす影響について検討し、長距離圧送時のコンクリートの性状変化のメカニズムについて考察を行った。その結果、本研究の範囲内で、以下のことが言える。

(1) 圧送距離が長いほど、スランプの低下量が大

きくなり、静置したものと比較して、1~3cm低下量が増加した。

(2) フレッシュコンクリート中の微粒子の粒度分布は、圧送後、粗粒子側にシフトした。混和剤の吸着量は、圧送前後および静置試料でほとんど変化せず、この間の水和の進行は少ないと考えられる。

(3) 流動性の低下は、時間経過だけではなく、圧送により微粒子が凝集することも影響することが確認された。

#### 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

- 熊野, 名倉, 高田: 長距離ポンプ圧送を考慮したコンクリート配合の検討, 土木学会年次学術講演概要集, VI-267, pp.530-531, 1994.9
- 土木学会編: コンクリートのポンプ施工指針(案), pp.1-61, 1985
- 岡田: 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
- 横井, 横田, 新藤: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.103-108, 1997
- 神代, 大池, 川口, 中根: 高流動コンクリートに関する実験的研究, 建築学会大会学術講演梗概集A, pp.749-750, 1997
- 大友, 岡沢, 植田: 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, 1993.5
- 粉体工学会編, 粒子径計測技術, 日刊工業新聞社, pp.49-67, 1994
- 飯塚, 水沼, 福島: GBRC, 日本建築総合研究所, [58] pp.21-28, 1990
- 名和, 江口, 大久保: セメントペーストおよびモルタルの流動性に及ぼす粉末度および粒度分布の影響, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.139-147, 1991.8