

# 高圧圧送がコンクリートの流動性に及ぼす影響に関する研究

太田 貴士\*<sup>1</sup>・加藤 優志\*<sup>1</sup>・渡邊 悟士\*<sup>1</sup>・山本 佳城\*<sup>1</sup>・黒岩 秀介\*<sup>1</sup>

Keywords : pumping, high pressure, compact pumping test equipment, lightweight concrete, high strength concrete, fluidity

ポンプ圧送, 高圧力, 小型圧送性試験装置, 軽量コンクリート, 高強度コンクリート, 流動性

## 1. はじめに

現在国内で最も高いビルとしては、高さ 300m の超高層ビルが実現されている<sup>1)</sup>。今後は高さ 300m を超える超高層ビルの建設が複数計画されており、そこでは国内未経験の高所へのコンクリート圧送が必要となる。既往の高さ 200m 級の超高層ビルにおいて必要な圧送圧力が 10~12N/mm<sup>2</sup> 程度であるのに対して、高さ 300m を超える超高層ビルの建設に必要な圧送圧力は 20N/mm<sup>2</sup> 程度に達すると予想される。海外では高さ 828m の超高層ビルが実現し、高さ 600m への圧送が行われている<sup>2)</sup>。また、Yan らは水結合材比 31% の高強度コンクリートを 555m の高さまで圧送しており、要した圧送圧力は最大 25N/mm<sup>2</sup> 程度で、コンクリートのスランプフローは圧送した先で 40mm 程度低下したと報告している<sup>3)</sup>。一方で国内では、20N/mm<sup>2</sup> 程度もの圧力が生じるポンプ圧送についての施工事例や研究事例はほとんど無く、圧送によるコンクリートの品質への影響や実現可能な吐出量などのデータが不十分である。

コンクリートの圧送性を評価・検討する方法に関して様々な研究<sup>(例えば 4), 5)</sup>がなされているものの、現状では圧送によるコンクリートの品質の変化を定量的に評価できる試験方法は確立されていない。圧送によるコンクリート品質の変化に関する資料がなく、コンクリートの要求品質を満足した圧送が可能か否かの予測ができない場合には、実大規模の圧送実験を行う必要がある<sup>6)</sup>。この場合、特に長距離圧送配管を要する条件では多大な労力や費用を要するため、室内試験規模の評価方法の確立が望まれている。

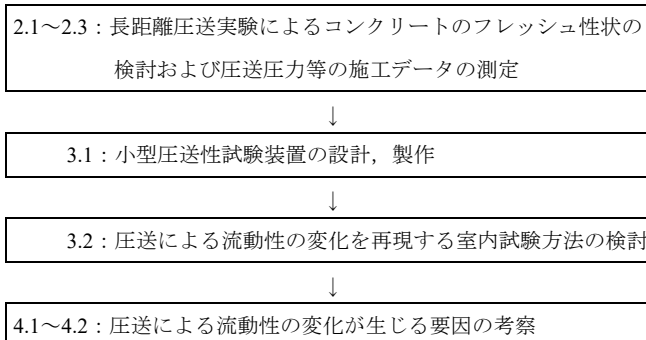


図-1 実験の構成

Fig.1 Composition of the experiment

以上の背景を踏まえ、本研究では高さ 300m を超える超高層ビルにおけるポンプ圧送によるコンクリート品質の変化を把握し、その変化を室内試験により再現する方法を検討すること、ならびに、圧送によるコンクリート品質の変化の要因を把握することを目的とした。

実験の構成を図-1 に示す。図中には対応する節番号を併記した。まず、高さ 300m を超える超高層ビルを想定した 20N/mm<sup>2</sup> 程度の高い圧送圧力を要する長距離圧送実験を行い、圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状の比較、ならびに圧送圧力等の施工データの測定を実施した。同実験で生じた圧送圧力を与えられる小型圧送性試験装置を設計、製作し、同実験によって生じたコンクリートの流動性の変化を、本装置を用いた室内試験により再現する方法を検討した。また、流動性の変化を再現した試験ケースについて、コンクリート中のセメント粒子の分散、混和剤の吸着、骨材の吸水等に着目した各種測定を行い、圧送による流動性の変化が生じる要因を考察した。

\* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室

## 2. 長距離圧送実験

### 2.1 コンクリートの使用材料および割合

長距離圧送実験を行うにあたり、高所圧送において現時点で課題があると考えられる下記のコンクリートを実験対象とした。

- (1) 高圧時の材料分離や軽量骨材の圧力吸水に伴う配管閉塞が懸念される軽量コンクリート1種。
- (2) 超高層ビルへの適用事例が多い鋼管充填コンクリートとして、低水セメント比で粘性が高く、圧入に必要な高い流動性と流動保持性が要求される高強度・高流動コンクリート。

圧送実験に用いたコンクリートの使用材料および割合を表-1、表-2に示す。軽量コンクリート1種（以下、LC という）は水セメント比 52%，スランブ 23(±2)cm とした。高強度・高流動コンクリート（以下、HC という）は中庸熱ポルトランドセメントを使用し、水セメント比 24.9%，スランブフロー70(±10)cm とした。

### 2.2 圧送実験概要

検討を行うコンクリートの圧送条件については、LC では最高圧送高さ 400m、最大吐出量 60m<sup>3</sup>/h、圧力損失 0.015N/mm<sup>2</sup>/m と想定し、圧送負荷は 14.7N/mm<sup>2</sup> と算出した。HC では最高圧送高さ 250m、最大吐出量 20m<sup>3</sup>/h、圧力損失 0.03N/mm<sup>2</sup>/m と想定し、圧送負荷は 17.3N/mm<sup>2</sup> と算出した。これらを満足する必要理論吐出圧力は 21.6N/mm<sup>2</sup> 以上と算定され、これを満足する最大理論吐出圧力を実現するコンクリートポンプを使用した。なお、圧送負荷および必要理論吐出圧力の算出には文献 6) を参照した。

圧送実験に用いた各コンクリートはアジテータ車でコンクリートポンプまで運搬した。圧送配管の水平換算長さは LC が 855m、HC が 412m であり、全ての鋼製圧送配管およびフレキシブルホース共に 125A を使用した。圧送配管の管内圧力はフラッシュダイアフラム型圧力計を用いて計測した。フレッシュコンクリートの試験は、荷卸し時および筒先についてスランブ、スランブフロー、空気量、コンクリート温度を測定した。また、圧送および経時によるフレッシュ性状への影響をそれぞれ確認するために、荷卸しの際に採取した試料の一部を静置状態で保管し、筒先で採取した試料と同時期に試験を実施した。

### 2.3 圧送実験結果

フレッシュ性状試験結果を表-3 に示す。LC では実吐出量 50m<sup>3</sup>/h で最大管内圧力が 21.0N/mm<sup>2</sup> となり、この場合の荷卸し時に対する圧送後のスランブの低下量は

表-1 軽量コンクリート1種の使用材料および割合

Table 1 Materials and mix proportions of lightweight concrete

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W1	C1	S1	S2	G1
LC	23	5.0	52	185	356	447	458	402

W1: 地下水  
 C1: 普通ポルトランドセメント, 密度 3.15g/cm<sup>3</sup>  
 S1: 陸砂, 表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 2.40  
 S2: 石灰石砕砂, 表乾密度 2.68g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 3.20  
 G1: 人工軽量粗骨材, 絶乾密度 1.30g/cm<sup>3</sup>, 実積率 64.0%, 吸水率 28%  
 ※G1 の単位量は絶乾状態における値を示した。  
 ※高性能 AE 減水剤を単位セメント量の 0.6% 使用した。

表-2 高強度・高流動コンクリートの使用材料および割合

Table 2 Materials and mix proportions of high-strength, high-fluidity concrete

記号	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				W2	C2	S3	G2
HC	70	2.0	24.9	185	743	619	870

W2: 上水道水  
 C2: 中庸熱ポルトランドセメント, 密度 3.21g/cm<sup>3</sup>  
 S3: 山砂, 表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 2.65  
 G2: 硬質砂岩砕石, 表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 実積率 61.0%  
 ※高性能 AE 減水剤を単位セメント量の 1.4% 使用した。

表-3 フレッシュ性状試験結果

Table 3 Fresh properties of concrete

調査	実吐出量 (m <sup>3</sup> /h)	最大管内圧力 (N/mm <sup>2</sup> )	試験時期	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)		50cm フロー到達時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)
					平均					
LC	50.0	21.0	荷卸し(圧送前)	24.5	47.6×47.3	47.5	-	5.0	15	10
			静置(圧送無し)	22.5	42.8×41.8	42.5	-	5.6	14	11
			筒先(圧送後)	10.5	24.2×23.8	24.0	-	4.2	21	11
HC	40.2	21.3	荷卸し(圧送前)	-	73.6×73.1	73.5	4.3	1.4	20	15
			静置(圧送無し)	-	76.9×75.5	76.0	3.6	0.9	19	15
			筒先(圧送後)	-	43.2×41.3	42.5	-	1.5	25	15

14cm であった。圧送による軽量コンクリートのスランブ低下量については、一般的な傾向は 1~4cm 程度<sup>6)</sup>、高さ 300m の超高層ビルの施工報告<sup>1)</sup>では 0~5cm である。これらと比べて本実験では、最大管内圧力が大きかったことが骨材への圧力吸水量の増加につながり、LC のスランブ低下量が大きくなったと考えられる。HC では実吐出量 40.2m<sup>3</sup>/h で最大管内圧力が 21.3N/mm<sup>2</sup> となり、この場合の荷卸し時に対する圧送後のスランブフローの低下量は 31cm であった。神代ら<sup>7)</sup>の圧送実験では、配管長 110m、実吐出量 45m<sup>3</sup>/h、最大管内圧力約 9N/mm<sup>2</sup> の場合、中庸熱ポルトランドセメントを使用した水セメント比 25.5% の高強度コンクリートの筒先のスランブフローは、荷卸し時の 71cm に対して 20cm 程度低下している。本実験におけるスランブフローの低下量の方が 11cm 程度大きくなっており、これは圧送距離や管内圧力の増大が影響していると考えられる。

以上の結果を踏まえ、次章では長距離圧送実験によって生じたコンクリートの流動性の変化を再現する室内試験方法について検討した。

### 3. 圧送による流動性低下を再現する室内試験方法の検討

#### 3.1 小型圧送性試験装置

ポンプ圧送によるコンクリートの流動性の変化を再現するために、配管内のコンクリートに圧力およびせん断力を与える小型圧送性試験装置を設計、製作した。本装置全体の外観を写真-1に、配管部の外観を写真-2に、配管部の概略図を図-2に示す。本装置はコンクリート試料を入れる直管を連結し、その両端に試料投入口、シリンダーおよびロードセルを取り付けている。油圧で作動するシリンダーにより配管内の試料に圧力を加えつつ、試料を往復移動させる。両端のシリンダーは共に配管内の試料を押し方向に油圧が作動し、両シリンダーの油圧に差を設けることで、油圧の小さい方のシリンダーが試料と共に押され、試料が配管内を移動する。所定の位置までシリンダーが移動したら両シリンダーの油圧の大きさを切り換えることで、それまで押す側だったシリンダーが試料と共に押されて反対方向に移動する。これを繰り返すことで配管内の試料を往復移動させる仕組みとした。配管内の試料には最大  $25\text{N/mm}^2$  程度の圧力を与えられる仕様とした。このような高い管内圧力を実現し、かつ室内で実施できる規模の装置とするために、配管の内径を  $\phi 50\text{mm}$  と小さくして油圧ポンプ等を含めた装置全体のサイズを抑えることとした。後述するフレッシュ性状試験に要する試料の量を考慮して、配管の全長は  $1100\text{mm}$  とした。長さ  $300\text{mm}$  の直管を2本と、長さ  $250\text{mm}$  の直管を2本連結するかたちとし、配管部の中央に連結した長さ  $250\text{mm}$  の配管2本について、管内圧力を計測する圧力計を設置した。シリンダーのストローク長は最大約  $300\text{mm}$ 、移動速度はおよそ毎秒  $25\text{mm}$  である。

本装置の配管内径が  $\phi 50\text{mm}$  であるため、最大寸法  $20\text{mm}$  の粗骨材を使用した通常のコンクリートでは、内径  $\phi 125\text{mm}$  の配管を用いた長距離圧送実験と比べて、配管内径に対する粗骨材径の比率が過大となる。そこで、本装置による圧送性試験は、ふるいにより  $10\text{mm}$  を超える粗骨材を除いたコンクリート（以下、G10mmコンクリートという）、モルタルおよびセメントペーストを試験対象とした。また、事前に予備実験を行い、通常のコンクリートとG10mmコンクリートおよびモルタルのフレッシュ性状試験結果の相関関係を把握し、得られた回帰式により、G10mmコンクリートおよびモルタルのフレッシュ性状試験結果を通常のコンクリートのフレッシュ性状試験結果に換算して比較検討した。

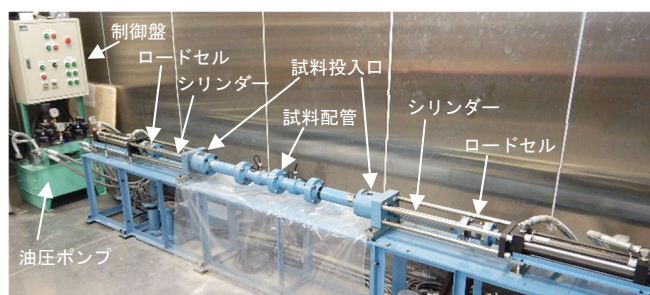


写真-1 小型圧送性試験装置の外観

Photo.1 Appearance of compact pumping test equipment

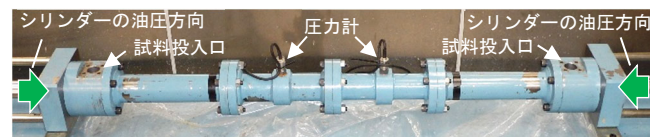


写真-2 配管部の外観

Photo.2 Appearance of the piping section

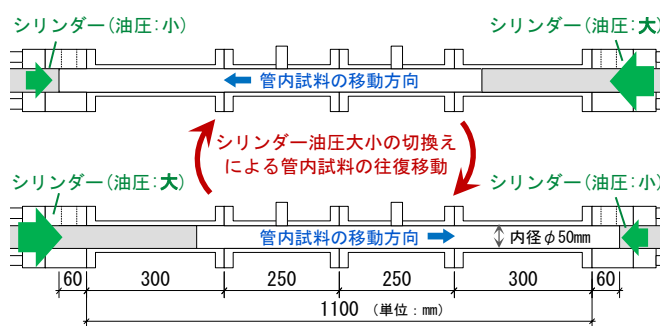


図-2 配管部の概略図

Fig.2 Schematic diagram of the piping section

#### 3.2 圧送性試験の概要および結果

本章および次章の圧送性試験に用いたG10mmコンクリート、モルタルおよびセメントペーストの使用材料および調合を表-4および表-5に示す。同表に併記した長距離圧送実験に用いたコンクリートの調合から、細骨材や粗骨材を除いてモルタルおよびセメントペーストの調合とした。練混ぜ量は  $5.5\text{L}$  とし、練り上がった試料について圧送性試験の実施直前にフレッシュ性状試験を行った。試料を  $2\text{L}$  採取して本装置の配管内に投入し、試料の加圧および管内移動を行った後、試料を配管から取り出して練り返し、フレッシュ性状試験を行った。その直後に、圧送性試験に用いずに静置させておいた試料のフレッシュ性状試験を行った。

各試料のフレッシュ性状試験について、G10mmコンクリートではJISA1171によるスランプ試験におけるスランプ（以下、ミニスランプ）および当該スランプの広がり（以下、ミニスランプフロー）を、モルタルおよびセメントペーストではJIS R 5201のフロー試験におけるフロー値（以下、15打フローという）もしくは、上記フロー試験に従ってフローコーンを取り去った後

のモルタルの広がり（以下、0打フローという）を測定した。また、いずれも試料温度を測定した。圧送性試験およびフレッシュ性状試験は温度 20℃、相対湿度 70%RH に設定した恒温恒湿室で実施した。

圧送性試験における管内圧力履歴の一例を図-3 に示す。圧送性試験においても実際のポンプ圧送のように、管内圧力が筒元で最大となり筒先に向かって低下していく圧力履歴となるよう試みたが、装置の都合上、試験開始後から徐々に圧力を高くしていく圧力履歴とした。梁らは、圧送性評価装置を用いた室内試験において、配管内コンクリートの積算受圧量から、コンクリート品質の変化による閉塞が生じる圧送距離を評価している<sup>5)</sup>。圧送によるコンクリート品質の変化に積算受圧量が関係していると考え、本圧送性試験においてはコンクリートの積算受圧量が長距離圧送実験と同等になるよう、最大管内圧力および圧送時間を設定した。

フレッシュ性状試験結果を表-6 に示す。表-6 のスランプフロー換算値と、表-3 に示した長距離圧送実験におけるスランプフローを比較すると、静置の結果および筒先と圧送性試験後の結果が近い傾向となった。すなわち LC では、長距離圧送実験の静置 42.5cm に対して圧送性試験の静置 43.9cm、筒先 24.0cm に対して圧送性試験後 29.1cm となり、HC では、長距離圧送実験の静置 76.0cm に対して圧送性試験の静置 74.1cm、筒先 42.5cm に対して圧送性試験後 45.4cm となった。また、長距離圧送実験では筒先のコンクリート温度が経時と比べて 6~7℃高くなっており、圧送性試験では、次章の試験結果も含めると圧送性試験後の試料温度が静置と比べて最大 6.3℃高くなった。

小型圧送性試験装置を用いた室内試験によって、実際の高所圧送と同等の管内圧力および圧送時間の条件下で、圧送によるコンクリートの流動性低下を再現できる可能性を得た。次章では、小型圧送性試験装置を用いて管内圧力の大小や管内移動の有無等を変えた圧送性試験、ならびにコンクリート中のセメント粒子の表面積や混和剤吸着量、骨材の含水率等に着目した測定を行い、圧送によるコンクリートの流動性低下の要因を検討した。

#### 4. 流動性の低下が生じる要因の検討

##### 4.1 圧送による流動性低下に及ぼす要因の絞込み

管内圧力の大小や管内移動の有無、骨材の有無等を変えて前述した圧送性試験を実施し、これらが圧送後の流動性低下に及ぼす影響を検討した。G10mm コンク

表-4 軽量コンクリート1種の使用材料および割合

Table 4 Materials and mix proportions of lightweight concrete

種類	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W1	C1	S1	S2	G1
コンクリート	5.0	52	185	356	439	448	402
G10mm コンクリート	5.8	52	214	414	505	519	260
モルタル	7.2	52	268	515	632	650	-
セメントペースト	-	52	532	1023	-	-	-

W1：地下水  
 C1：普通ポルトランドセメント，密度 3.15g/cm<sup>3</sup>  
 S1：陸砂，表乾密度 2.55g/cm<sup>3</sup>，粗粒率 2.40  
 S2：石灰石砕砂，表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>，粗粒率 3.20  
 G1：人工軽量粗骨材，絶乾密度 1.30g/cm<sup>3</sup>，実積率 64.0%，吸水率 28%  
 ※G1 の単位量は絶乾状態における値を示した。  
 ※コンクリートにおける目標スランプ 23±2cm を得るために高性能 AE 減水剤を単位セメント量の 0.9~1.2% の範囲で使用した。  
 なお，セメントペーストは混和剤無しで十分な流動性を得られた。

表-5 高強度・高流動コンクリートの使用材料および割合

Table 5 Materials and mix proportions of high-strength, high-fluidity concrete

種類	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W2	C2	S3	G2
コンクリート	2.0	24.9	185	743	619	870
G10mm コンクリート	2.5	24.9	232	932	775	415
モルタル	3.0	24.9	275	1104	913	-
セメントペースト	-	24.9	424	1703	-	-

W2：上水道水  
 C2：中庸熱ポルトランドセメント，密度 3.21g/cm<sup>3</sup>  
 S3：山砂，表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>，粗粒率 2.65  
 G2：硬質砂岩砕石，表乾密度 2.68g/cm<sup>3</sup>，実積率 61.0%  
 ※コンクリートにおける目標スランプフロー 70±10cm を得るために高性能 AE 減水剤を単位セメント量の 1.1~1.46% の範囲で使用した。

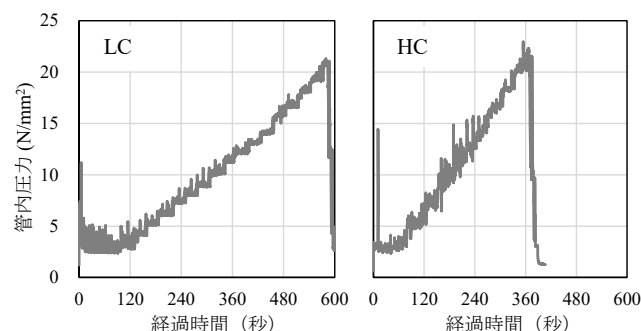


図-3 圧送性試験における管内圧力履歴の一例

Fig.3 Example of in-pipe pressure history in pumping test

表-6 フレッシュ性状試験結果

Table 6 Fresh properties of concrete

調査	試験時期	ミニスランプ	ミニスランプフロー		スランプ換算値 (cm)	スランプフロー換算値 (cm)	試料温度 (°C)
		(cm)	(mm)				
LC	圧送性試験前	12.4	215 × 211	213	22.6	46.2	20.8
	静置	12.0	204 × 199	202	22.1	43.9	20.3
	圧送性試験後	8.9	130 × 122	126	14.0	29.1	21.0
HC	圧送性試験前	13.9	346 × 342	344	-	72.4	22.2
	静置	13.9	358 × 356	357	-	74.1	21.0
	圧送性試験後	12.0	204 × 200	202	-	45.4	23.3

リートのフレッシュ性状試験結果を表-7 に示す。圧力および管内移動を生じさせず、前述した試験時間だけ配管内で静置させた試料についても流動性が若干低下した。配管内から試料を取り出す作業の際に、セメントペースト分のロスが生じているためと考えられる。この低下量をオフセット値として各試験の低下量から差し引いて比較検討することとした。圧送性試験後のスランプフロー換算値の低下量を図-4 に示す。図-4(a)より、管内圧力を最大 21N/mm<sup>2</sup> 程度とした場合に、管内移動無しの条件よりも管内移動有りの条件の方が、スランプ・スランプフロー換算値が低下した。管内移動によってコンクリートに生じたせん断力が、流動性の低下に影響したと考えられる。図-4(b)より、管内移動有りの場合に、最大管内圧力が 5N/mm<sup>2</sup> よりも 21N/mm<sup>2</sup> の方がスランプ・スランプフロー換算値の低下しており、管内圧力の大小がコンクリートの流動性の低下に影響することが確認された。

モルタルについて、LC の圧送性試験後のスランプ換算値の変化量は-0.2cm、HC の圧送性試験後のスランプフロー換算値の変化量は+1.8cm となった。セメントペーストについてはLCおよびHC共に0打フローの変化はほとんど生じなかった。これらの結果から、圧送によるコンクリートの流動性低下には粗骨材の存在が大きく影響していることが分かった。この要因としては、粗骨材自身の吸水や欠損、すりへりのほか、コンクリート中の粗骨材の移動によってセメントペーストや細骨材に及ぼすせん断力の影響が考えられる。また、モルタルおよびセメントペーストの圧送性試験後の試料温度は上昇しておらず、長距離圧送実験で確認された圧送後におけるコンクリート温度の上昇は、粗骨材が混入することで生じることが分かった。

以上を踏まえ、圧送による流動性低下の主要因を圧力およびせん断力の 2 種類、主要因が影響を及ぼす対象をセメントペースト、細骨材、粗骨材の 3 種類に分類し、流動性低下の要因を表-8 に示す分類記号 A~F の 6 種類と仮定した。

分類記号 A についてはセメントペーストの圧送性試験結果から、流動性への影響は無いと判断した。

分類記号 B および C について、軽量骨材のように吸水率の大きい細骨材や粗骨材を使用した場合、骨材への圧力吸水が流動性低下の要因になり得ると考えられる。なお、本研究の検討調査では、細骨材への圧力吸水は流動性に影響を及ぼしていないと判断した。

分類記号 D について、セメントペーストおよびモルタルの圧送性試験結果から、これら単体の圧送によ

表-7 フレッシュ性状試験結果 (G10mm コンクリート)

Table 7 Fresh properties of concrete

調査	最大管内圧力 (N/mm <sup>2</sup> )	管内移動	試験時期	ミナス スランプ (cm)	ミナス スランプ フロー (mm)	スランプ換算値		スランプフロー換算値		試料 温度 (°C)		
						低下量		低下量				
						オフセット 後	オフセット 後	オフセット 後	オフセット 後			
LC	0 (オフセット)	無し	静置	11.3	191	21.4	-2.0	0.0	41.8	-4.7	0.0	22.3
			装置内静置後	11.3	167	19.4			37.1			21.3
	21	無し	静置	11.5	188	21.3	-6.4	-4.4	41.3	-11.1	-6.4	21.5
			圧送性試験後	8.5	132	14.9			30.2			21.4
	21	有り	静置	11.8	192	21.5	-10.4	-8.4	42.1	-16.2	-11.5	21.4
			圧送性試験後	5.3	110	11.1			25.9			22.7
	5	有り	静置	12.1	210	22.5	-6.2	-4.2	45.6	-13.4	-8.7	21.6
			圧送性試験後	9.0	142	16.3			32.2			22.3
HC	0 (オフセット)	無し	静置	14.1	367	-	-	-	75.3	-1.9	0.0	23.8
			装置内静置後	14.1	351	-			73.4			22.5
	21	無し	静置	14.1	368	-	-	-	75.4	-6.9	-5.0	22.6
			圧送性試験後	13.7	317	-			68.5			22.3
	21	有り	静置	14.0	366	-	-	-	75.1	-28.9	-27.0	22.5
			圧送性試験後	12.5	206	-			46.2			26.0
	5	有り	静置	14.1	368	-	-	-	75.4	-16.7	-14.8	22.7
			圧送性試験後	13.0	262	-			58.7			25.6

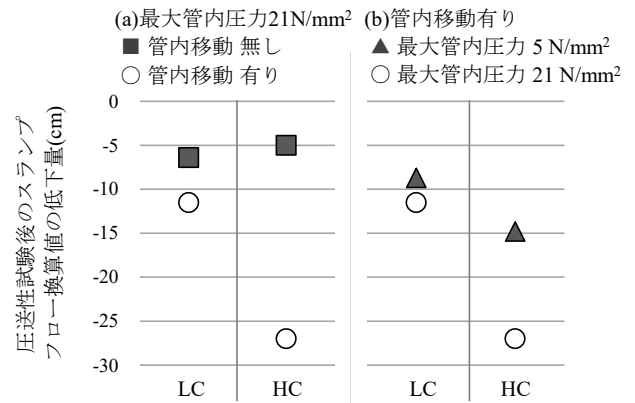


図-4 圧送性試験後のスランプフロー換算値の低下量  
Fig.4 Decrease in slump flow conversion value after pumping test

表-8 流動性低下の要因および測定項目

Table 8 Cause of decline in fluidity and measurement items

分類 記号	主 要因	対象	想定される現象	測定項目
A	圧力	セメント ペースト	・本研究においては流動性への影響 は無いと判断	-
B		細骨材	・本研究においては流動性への影響 は無いと判断	-
C		粗骨材	・粗骨材の圧力吸水によるセメント ペースト中の水分の減少	・粗骨材の含水率
D	せん 断力	セメント ペースト	・セメント粒子の分散による 表面積の増大 ・水和の促進、凝結時間の短縮 ・混和剤吸着量の変化	・セメント粒子の BET 比表面積 ・凝結時間 ・混和剤吸着量
E		細骨材	・細骨材の欠損、すりへりによる 細粒分の増加	・骨材粒度分布
F		粗骨材	・粗骨材の欠損、すりへりによる 細粒分の増加	・骨材粒度分布

て生じるせん断力は流動性にほとんど影響を及ぼさないが、粗骨材が混入することで生じる圧送時のせん断力は、流動性に影響を及ぼすものと推察した。

分類記号 E および F について、圧送時に粗骨材と周囲の細・粗骨材および管壁との間で生じる衝突や摩擦

によって、欠損やすりへりが生じると推察した。これにより、コンクリート中の骨材の粒度が細くなることで流動性が低下すると考えた。

次節では分類記号 C, D, E, F の可能性を検討し、圧送によるコンクリートの流動性低下が生じるメカニズムについて考察した。

#### 4.2 圧送による流動性低下メカニズムの考察

G10mm コンクリートを用いて最大管内圧力 21N/mm<sup>2</sup> 以上、管内移動有りの条件で圧送性試験を行い、圧送性試験後の試料および静置した試料のフレッシュ性状試験を実施した後、各試料について表-8 に示した各種測定を行った。また、予め 105℃ で絶乾状態にした人工軽量粗骨材を用いた LC について、上記と同様に圧送性試験およびフレッシュ性状試験を実施した後、粗骨材の含水率の測定を行った。フレッシュ性状試験結果および測定項目を表-9 に示す。

##### 4.2.1 粗骨材の含水率

粗骨材の含水率は、ウェットスクリーニングにより採取した粗骨材について、骨材表面の水分を布でふき取った後の質量および 105℃ で絶乾状態にした質量を測定して算出した。粗骨材の含水率測定結果を図-5 に示す。LC の圧送性試験後の粗骨材含水率は 23.0% から 23.2% に若干増大した。軽量粗骨材を絶乾状態で使用した場合には、粗骨材含水率は 2.5% から 14.3% に著しく増大しており、流動性も大きく低下した。軽量粗骨材が十分に含水していないと圧送時にコンクリート中の水分が吸水され、流動性低下の要因になることが確認された。HC では圧送性試験後の粗骨材含水率は 0.89% から 0.86% とわずかな変化量であり、粗骨材への圧力吸水は流動性低下の要因ではないと考えられる。

##### 4.2.2 凝結時間

凝結時間は、ウェットスクリーニングにより採取したモルタルについて、自動凝結試験装置を用いて測定した。凝結時間測定結果を図-6 に示す。LC および HC 共に圧送性試験後の凝結時間は早くなった。始発時間を比べると、LC では 59 分 (8 時間 6 分 → 7 時間 7 分)、HC では 2 時間 22 分 (8 時間 8 分 → 5 時間 46 分) 早くなった。圧送により水和の促進や高性能 AE 減水剤の分散効果の低下が生じた可能性が示唆された。

##### 4.2.3 セメント粒子の比表面積

セメント粒子の BET 比表面積の測定手順は次のとおりとした。ウェットスクリーニングにより採取したモルタルをアセトンと混合、攪拌し、吸引ろ過によりモルタルの固相部を取り出す作業を 3 回繰り返した後、モルタルの固相部をアセトンに 1 日浸漬した。40℃ で

表-9 フレッシュ性状試験結果および測定項目

Table 9 Fresh properties of concrete and measurement items

調査	試験時期	ミニスランブ	ミニスランブフロー		スランブ換算値		スランブロー換算値		試料温度 (°C)	測定項目
		(cm)	(mm)	平均	(cm)	低下量	(cm)	低下量		
LC	静置	12.7	223 × 217	220	22.8	-	47.6	-18.3	21.3	セメント粒子の比表面積
	圧送性試験後	8.8	132 × 122	127	14.1	-8.7	29.3	-	21.3	
	静置	13.0	233 × 232	233	22.9	-	50.0	-20.5	21.1	凝結時間
	圧送性試験後	9.3	130 × 126	128	14.3	-8.6	29.5	-	21.4	
	静置	12.5	218 × 206	212	22.5	-	46.0	-15.4	20.9	混和剤吸着量
	圧送性試験後	8.3	137 × 130	134	15.2	-7.3	30.6	-	21.5	
LC 絶乾粗骨材	静置	12.9	236 × 225	231	22.9	-	49.6	-18.5	21.8	骨材粒度分布、粗骨材の含水率
	圧送性試験後	9.2	140 × 132	136	15.5	-7.4	31.1	-	22.3	
HC	静置	12.3	244 × 242	243	22.9	-	52.1	-25.7	20.5	粗骨材の含水率
	圧送性試験後	4.5	114 × 110	112	11.5	-11.4	26.4	-	22.0	
	静置	14.0	357 × 356	357	-	-	74.1	-45.8	21.3	セメント粒子の比表面積
	圧送性試験後	8.7	140 × 139	140	-	-	28.3	-	25.0	
	静置	14.2	362 × 349	356	-	-	73.9	-48.4	22.4	凝結時間
	圧送性試験後	9.0	131 × 129	130	-	-	25.5	-	28.7	
HC 混和剤吸着量	静置	14.0	352 × 349	351	-	-	73.3	-31.5	20.5	混和剤吸着量
	圧送性試験後	12.5	189 × 187	188	-	-	41.8	-	24.2	
HC 骨材粒度分布、粗骨材の含水率	静置	14.0	351 × 341	346	-	-	72.7	-49.5	20.1	骨材粒度分布、粗骨材の含水率
	圧送性試験後	7.9	124 × 121	123	-	-	23.2	-	26.1	

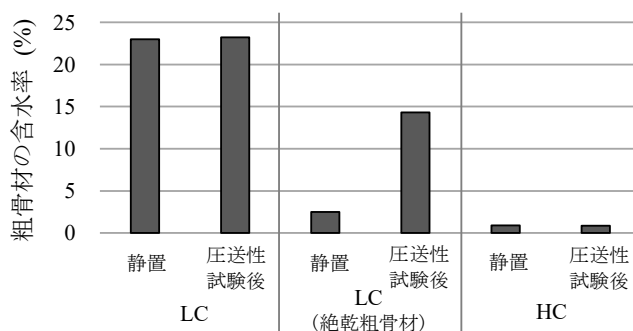


図-5 粗骨材の含水率  
Fig.5 Water content of coarse aggregate

24 時間以上乾燥させた後の固相部を 0.075mm でふるって粉末試料とし、105℃ で乾燥させて測定用試料とした。BET 比表面積は窒素吸着法一点式により測定した。

セメント粒子の BET 比表面積測定結果を図-7 に示す。圧送性試験後のセメント粒子の BET 比表面積は、LC では 3.04m<sup>2</sup>/g から 3.14m<sup>2</sup>/g に、HC では 2.88m<sup>2</sup>/g から 3.30m<sup>2</sup>/g に増大した。菅俣ら<sup>8)</sup>は、ミキサの練混ぜ時間を 10~30 分程度延長することにより、中庸熟ポルトランドセメントを使用したモルタルにおけるセメント粒子の比表面積が、およそ 2.8m<sup>2</sup>/g から 3.2~3.3m<sup>2</sup>/g に増大することを確認している。この要因について菅俣らは、練混ぜによって粒子の分散化が進行すると、水和反応生成物の増加に伴いセメント粒子の比表面積が大きくなると報告している。本実験において、圧送性試験後に凝結時間が短縮し、セメント粒子の比表面積が増大した結果から、コンクリートの圧送時にはミキサによる練混ぜと同様の現象が起きていると推察される。

#### 4.2.4 混和剤吸着量

混和剤吸着量の測定手順は次のとおりとした。ウェットスクリーニングにより採取したモルタルを遠心分離器にかけて液相を採取し、TOC計を用いて全有機炭素量を測定した。この液相中に残存している混和剤量（以下、未吸着量という）を、混和剤添加量から差し引いて得られた値を吸着量とした。

高性能AE減水剤の吸着量および未吸着量の測定結果を図-8に示す。LCおよびHC共に圧送性試験後の未吸着量は減少した。菅俣ら<sup>8),9)</sup>によると未吸着量が多いと高性能AE減水剤の粒子分散効果が大きくなることが確認されている。すなわち未吸着量が減少すると、高性能AE減水剤の粒子分散効果が小さくなり、コンクリートの流動性が低下すると考えられる。したがって、本実験におけるコンクリートの流動性の低下は、高性能AE減水剤の未吸着量の減少が要因のひとつであると考えられる。このような未吸着の高性能AE減水剤が分散効果を示す仕組みとしてデプレッション分散安定化効果<sup>10)</sup>が挙げられる。これは、未吸着高分子あるいは飽和吸着後の余剰高分子が溶液中に存在する場合、分散粒子が接近してもその隙間に余剰高分子が存在し、粒子が凝集できずに粒子の分散安定化に作用する効果である。特に超高強度コンクリートのような富配合な系では、減水剤を過剰添加し所要の流動性を得ていることが多く、このような場合、減水剤が結合材粒子に吸着せずにフリーな状態で存在し、分散安定化に大いに寄与すると考えられている<sup>11)</sup>。本実験の場合、未吸着量の減少による流動性低下への影響は、LCよりも富配合であるHCの方が大きいものと考えられる。

混和剤の吸着量および未吸着量をセメント粒子のBET比表面積で除した単位セメント表面積当たりの混和剤量を図-9に示す。圧送性試験後の単位セメント表面積当たりの吸着量は、LCが0.86mg/m<sup>2</sup>から0.85mg/m<sup>2</sup>に、HCが1.44mg/m<sup>2</sup>から1.42mg/m<sup>2</sup>に減少した。菅俣ら<sup>8)</sup>は、ミキサの練混ぜ時間を10~30分程度延長することにより、中庸熟ポルトランドセメントを使用したモルタルにおける単位セメント表面積当たりの吸着量が、約2.75mg/m<sup>2</sup>から2.65~2.72mg/m<sup>2</sup>に減少することを確認している。また、単位セメント表面積当たりの吸着量が多いほど高性能AE減水剤の粒子分散効果が大きくなることを示している。本実験においても、単位セメント表面積当たりの吸着量の減少によって、高性能AE減水剤の粒子分散効果が小さくなり、コンクリートの流動性が低下したと考えられる。

混和剤の未吸着量についても、単位セメント表面積

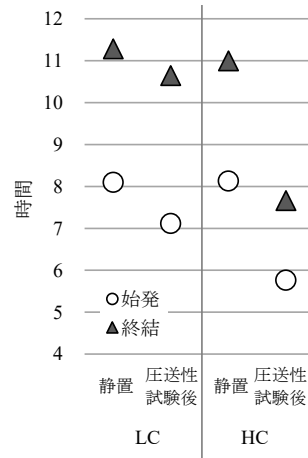


図-6 凝結時間  
Fig.6 Setting time

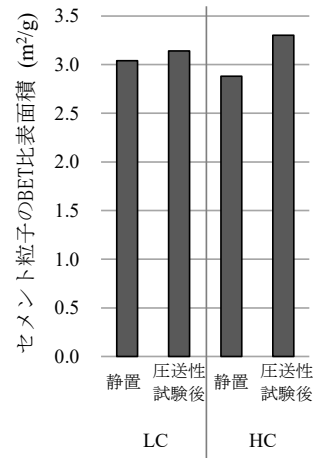


図-7 セメント粒子の表面積  
Fig.7 Surface area of cement particles

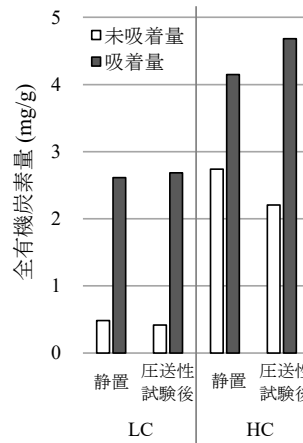


図-8 混和剤の吸着量および未吸着量  
Fig.8 Adsorbed and unadsorbed amount of admixture

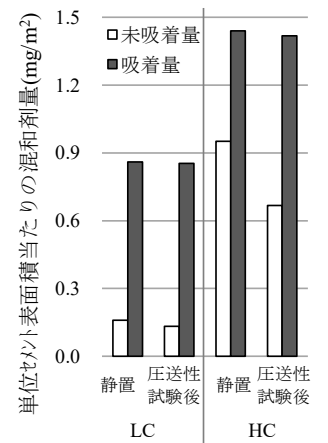


図-9 単位セメント表面積当たりの混和剤量  
Fig.9 Amount of admixture per unit cement surface area

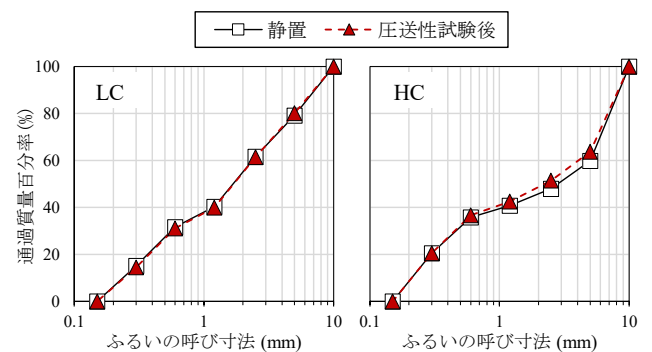


図-10 骨材の粒度分布  
Fig.10 Particle size distribution of aggregate

当たりの未吸着量を用いて比較すると、圧送性試験後の上記未吸着量は、LCでは0.16mg/m<sup>2</sup>から0.13mg/m<sup>2</sup>に、HCでは0.95mg/m<sup>2</sup>から0.67mg/m<sup>2</sup>に減少した。この減少率はLCよりもHCの方が大きくなっており、このことから、前述したとおり未吸着量の減少による流動性低下への影響はHCの方が大きいと考えられる。

#### 4.2.5 骨材粒度分布

骨材粒度分布は、G10mm コンクリート試料を水洗いしながらふるい分けを行い、各試料を105℃で乾燥させた後に質量を測定して求めた。ふるい分けには呼び寸法 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15mm のふるいを使用した。骨材の粒度分布測定結果を図-10 に示す。LC では静置および圧送性試験後の粒度分布はほぼ同等であった。一方 HC では、ふるいの呼び寸法 0.6mm 以上の範囲で圧送性試験後の粒度分布が細かい方へ若干シフトした。コンクリートの調合や使用骨材の種類によっては、圧送により骨材の欠損やすりへりが起き、細粒分が増加する可能性が見られた。

#### 4.2.6 測定結果および考察のまとめ

以上より、コンクリートの圧送によってセメント粒子の比表面積、混和剤吸着量、骨材の含水率や粒度分布等に変化が生じることが分かった。軽量骨材への圧力吸水やセメント粒子の比表面積の増大、液相中に残存する混和剤未吸着量の減少、単位セメント表面積当たりの混和剤吸着量の減少、骨材の欠損やすりへりによる細粒分の増加といった複数の要因が、圧送によるコンクリートの流動性低下に影響を及ぼしており、各要因の影響度はコンクリートの種類や調合によって異なると考えられる。

### 5. まとめ

本研究では、軽量コンクリート 1 種および高強度・高流動コンクリートを対象として、高さ 300m を超える超高層ビルを想定した高圧圧送がコンクリートの流動性に及ぼす影響を実大規模の圧送実験により確認した。また、この影響を小型の試験装置を用いた室内試験で評価する方法について検討すると共に、圧送による流動性の変化が生じる要因について考察した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 高さ 300m を超える超高層ビルを想定した長距離圧送実験の結果、実吐出量 40～50m<sup>3</sup>/h を得るための圧送圧力は 21N/mm<sup>2</sup> 程度に達し、既往の圧送圧力 9～12N/mm<sup>2</sup> までのポンプ圧送よりも筒先のスランプおよびスランプフローの低下量は大きくなった。
- (2) 配管内のコンクリートに圧力およびせん断力を与える小型圧送性試験装置を考案した。本装置を用いた室内試験によって、実際の高所圧送と同等の管内圧力および圧送時間の条件下で、圧送によるコンク

リートの流動性低下を再現できる可能性を得た。

- (3) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験の結果、圧送によるコンクリートの流動性低下には、粗骨材の存在が大きく影響していることが分かった。
- (4) 小型圧送性試験装置を用いた室内試験および各種測定の結果、圧送によってセメント粒子の比表面積や混和剤吸着量等に変化が生じることが分かった。圧送によるコンクリートの流動性低下には下記①～⑤の要因が影響しており、各要因の影響度はコンクリートの種類や調合によって異なると考えられる。
  - ① 軽量骨材への圧力吸水
  - ② セメント粒子の比表面積の増大
  - ③ 液相中に残存する混和剤未吸着量の減少
  - ④ 単位セメント表面積当たりの混和剤吸着量の減少
  - ⑤ 骨材の欠損、すりへりによる細粒分の増加

#### 参考文献

- 1) 岩清水隆, 青木義彦, 九嶋壮一郎, 永野浩一: 軽量コンクリートの高さ 300m への超高所圧送—高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」—, コンクリート工学, Vol.51, No.8, pp.648-655, 2013.
- 2) 杉山知巳: アジア太平洋地域におけるコンクリート用化学混和剤の適用の動向, コンクリート工学, Vol.49, No.9, pp.40-43, 2011.
- 3) Yan, P., Han, J., Li, M., Liu, Y.: Pumping Process of High Strength Self-consolidating Concrete in the Construction of Skyscraper, Rheology and Processing of Construction Materials, RheoCon 2019, SCC 2019, RILEM Bookseries 23, pp. 346-352, 2020.
- 4) 作栄二郎, 大内雅博, 筒井浩平: 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.
- 5) 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛, 橋本貴之: 加圧履歴に基づいたコンクリートの圧送性の室内評価試験方法に関する研究, コンクリート工学, Vol.58, No.12, pp.937-943, 2020.
- 6) 日本建築学会: コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, 2009.
- 7) 神代泰道, 一瀬賢一, 都築正則: 高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1217-1222, 2006.
- 8) 菅俣匠, 日比野誠, 大内雅博, 岡村甫: 練混ぜ時における高性能 AE 減水剤の粒子分散効果に関する定量的評価, 土木学会論文集, No.634, V-45, pp.255-267, 1999.
- 9) 菅俣匠, 日比野誠, 大内雅博, 岡村甫: セメント粒子の分散性に及ぼすポリカルボン酸ポリマーの分子構造の影響, 土木学会論文集, No.662, V-49, pp.17-27, 2000.
- 10) 北原文雄編: 分散・凝集の解明と応用技術, テクノシステム, p.146, 1992.
- 11) 太田晃: 超高強度コンクリート用高性能 AE 減水剤の現状, コンクリート工学, Vol.34, No.5, pp.23-32, 1996.