

論文 増粘剤を用いた軽量コンクリートの粘性と骨材への加圧吸水に関する基礎的研究

井上 裕太*1・酒井 正樹*1・田中 寛人*1・神代 泰道*2

要旨：超高層建築の増加に伴い、軽量コンクリートの使用も増加している。軽量コンクリートに使用される軽量骨材は多孔質のため、高所圧送時には骨材への加圧吸水により流動性の低下が懸念される。本研究では増粘剤使用時の骨材への加圧吸水の抑制を実験的に確認した。その結果、軽量コンクリートに増粘剤を用いると、加圧ブリーディング試験による脱水量には差異が見られない一方で、骨材への加圧吸水量は減少する傾向が確認された。また、骨材への加圧吸水量とスランプロスには相関があり、増粘剤を用いて粘性を操作することで、軽量コンクリートの圧送性を改善できる見通しを得た。

キーワード：軽量コンクリート、軽量骨材、増粘剤、粘性、吸水量、スランプロス、高所圧送

1. はじめに

近年 200m を超えるような超高層建築の増加に伴い、コンクリートの高所圧送の機会も増加傾向にある。超高層建築では、構造部材が負担する荷重の軽減を目的として、床スラブに軽量骨材を用いた軽量コンクリートが用いられることがある。しかし、軽量コンクリートの骨材として用いられる人工軽量骨材は容積で 40%以上の空隙を含む多孔質体であるため、コンクリートポンプによる圧送（以下、ポンプ圧送とする）で圧力が加わるとコンクリート中の水分を吸収し、流動性の低下や配管閉塞が懸念される。既往の研究¹⁾²⁾では、コンクリートに特殊増粘剤を用いることで、コンクリートの粘性を高め、軽量骨材内への水分の吸収を抑制できることが示されている。また、コンクリートの高所への圧送可否を室内実験によって簡易に判定可能な方法³⁾についても研究がなされている。

人手不足を背景とした生産性向上に対応するため、2019年に JIS A 5308 レディーミクストコンクリートが改正され、普通骨材を用いた場合には、スランプロスで管理する普通強度領域のコンクリートが JIS 品として利用可能となった。そのため、混和剤メーカー各社は種々の増粘剤を展開しており、これらを用いることで軽量コンクリートにおいても粘性を自由にコントロール可能になることが期待される。そこで本研究では、コンクリートの粘性を操作することで、高所への軽量コンクリートのポンプ圧送性を改善することを目的とする。本報では基礎的研究として、一般にコンクリートの圧送性を簡易に判定する手法として用いられる加圧ブリーディング試験をはじめとして、コンクリートの粘性や軽量骨材の加圧吸水量、スランプロスを測定し、これらの関係を検討した。

2. 実験概要

2.1 軽量骨材への加圧吸水の抑制

軽量骨材は普通骨材と比較して内部に多数の空隙をもつ多孔質体であるため、圧力を加えると容易に吸水する。既往の研究⁴⁾においても、ポンプ圧送による軽量骨材への加圧吸水の影響で、高所への圧送になるほどスランプロスの低下量が大きくなることが示されている。多孔質体に液体が侵入する際の浸透深さは Lucas-Washburn 式(1)で示される。

$$L = \sqrt{\frac{r\sigma\cos\varphi}{2\mu}t} \quad (1)$$

ここで、 L ：浸透深さ、 r ：毛細管の半径、 σ ：表面張力
 φ ：接触角、 t ：時間、 μ ：液体の粘性

式(1)は液体の粘性を変数とした関数であり、液体の粘性が大きくなるほど、多孔質体への液体の浸透深さは小さくなる。よって、コンクリート中の液相の粘性が大きければ、多孔質体である軽量骨材への吸収を抑制することが可能であると考えられる。

2.2 実験計画

本研究の実験計画を表-1に示す。シリーズ1～3の3つの実験で構成する。シリーズ1では、測定対象をモルタルとし、回転粘度計およびモルタル用 V 漏斗試験器を用いた流下試験（以下、Vm 漏斗流下試験とする）により、増粘剤を使用したモルタルの粘性を測定する。シリーズ2では、測定対象を軽量コンクリートとし、増粘剤を使用した軽量コンクリートの加圧ブリーディング試験（以下、排水法とする）における脱水量を測定する。また、加圧ブリーディング試験と同一の要領で、排水をせずに加圧を行った（以下、密閉法とする）後の軽量骨材の吸水量も測定する。シリーズ3では、測定対象を普通コンクリート、軽量コンクリートとし、増粘剤を使用し

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

たコンクリートの配管内での加圧後のスランブロスと軽量骨材の吸水量を測定する。これらの実験により、増粘剤の使用によるコンクリートの粘性、加圧後の軽量骨材の吸水率、スランブロスの関係を明らかにする。各シリーズの実験フローを図-1に示す。

シリーズ1, 2における実験水準として、増粘剤の粘性3水準に加え、基準となる増粘剤なしの条件を合わせた4水準とした。シリーズ3における実験水準として、粘性が高い場合の性状に注目し、増粘剤の粘性は中、大の2水準とし、基準となる増粘剤なしの条件を合わせた3水準とした。

3. 実験方法

3.1 モルタルおよびコンクリート

モルタルおよびコンクリートの使用材料を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント (N)，細骨材は木更津産の陸砂 (S) を用いた。粗骨材は軽量コンクリート1種では人工軽量骨材 (LG)，比較のための普通コ

ンクリートでは秩父産の碎石 (HG) を用いた。人工軽量骨材は十分プレウェッティングを行ったものとした。なお、混和剤として高性能 AE 減水剤 (SP)，AE 助剤 (AE)，消泡剤 (AT) を添加し、所定のスランブや空気量が得られるように調整した。化学混和剤の使用量は、事前の試し練りにより決定した。また、粘性を付与するために増粘剤 (V) を添加した。使用した増粘剤の種類を表-3に示す。3種類のうち相対的に粘性の小さいものとしてアミン系混合物 (AM)，中くらいのものとしてアルカリ増粘剤 (AL)，大きいものとしてセルローズ系増粘剤 (SEL) を選定した。AM，AL は液体，SEL は粉体の増粘剤である。各増粘剤の添加量を表-4に示す。増粘剤の添加量はメーカー推奨範囲内での最大量とし，SPにて所定のスランブが得られるように調整した。

表-2 使用材料

種類	記号	概要
セメント	N	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	S	陸砂 (木更津産陸砂) 表乾密度 2.59g/cm ³ 吸水率 2.44%
粗骨材	HG	碎石 (秩父産碎石) Gmax 20mm 表乾密度 2.71g/cm ³ 吸水率 0.56%
	LG	人工軽量骨材 Gmax 15mm シリーズ2使用ロット 絶乾密度 1.28g/cm ³ 吸水率 29.0% 含水率 30.0% (表面水率 0.8%) シリーズ3使用ロット 絶乾密度 1.33g/cm ³ 吸水率 27.0% 含水率 28.0% (表面水率 0.8%)
水	W	上水道水
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 (主成分: ポリカルボン酸コポリマー)
	V	増粘剤 (主成分: 表-3 参照)
	AE	AE 助剤 (主成分: 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)
	AT	消泡剤 (主成分: ポリアルキレングリコール誘導体)

表-1 実験計画	
シリーズ1 粘性評価	
測定対象	・モルタル
測定項目	・回転粘度計 ・Vm漏斗流下試験
実験水準	・増粘剤なし ・増粘剤使用 粘性 小, 中, 大
シリーズ2 加圧ブリーディング試験後の性状評価	
測定対象	・軽量コンクリート
測定項目	・排水法による加圧後の脱水量 ・密閉法による加圧後の軽量骨材の吸水量
実験水準	・増粘剤なし ・増粘剤使用 粘性 小, 中, 大
シリーズ3 配管内加圧後の性状評価	
測定対象	・普通コンクリート ・軽量コンクリート
測定項目	・加圧後のスランブロス ・加圧後の軽量骨材の吸水量
実験水準	・増粘剤なし ・増粘剤使用 粘性 中, 大

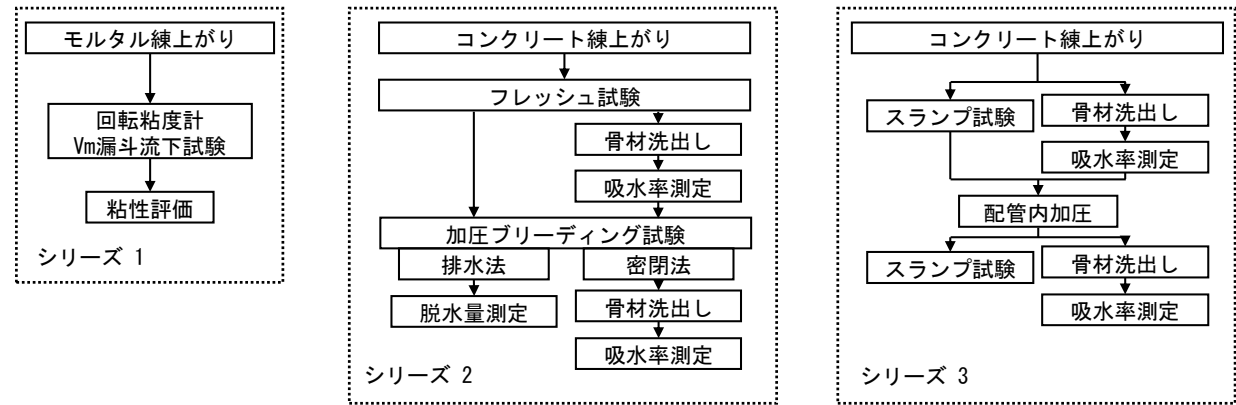


図-1 実験フロー

3.2 シリーズ1

(1) 測定対象

シリーズ1で使用するモルタルの調合を表-5に示す。W/Cは35%, 45%, 55%の3水準とした。目標フロー（JIS R 5201 セメントの物理試験方法におけるフロー）は240±10mmとした。測定対象は表-3に示す各増粘剤を表-5に示す各W/Cの調合に添加したモルタルとした。

(2) 回転粘度計

モルタルの粘性の測定に用いる回転粘度計を図-2に示す。偏心した球体治具を回転させることで、せん断速度に対するせん断応力およびせん断粘度の関係を測定⁵⁾し、塑性粘度をビンガム近似で算出した。

(3) Vm漏斗流下試験

モルタルの粘性の指標としてVm漏斗流下試験を行った。Vm漏斗流下試験ではコンクリート用のV漏斗と同様の小型の漏斗に満たしたモルタルが流下する時間をVm漏斗流下時間として測定⁶⁾した。

3.3 シリーズ2

(1) 測定対象

シリーズ2で使用するコンクリートの調合は目標スランプ21±2.5cm、目標空気量5.0±1.5%とし、表-6に示す。測定対象は表-3に示す各増粘剤を表-6に示す軽量コンクリートの調合に添加したものと増粘剤なしの計3水準の軽量コンクリートとした。各コンクリートの練上がり時のフレッシュ性状を表-7に示す。

(2) 排水法による加圧後の脱水量の測定

表-3 増粘剤の種類

種類	タイプ	粘性	記号
アミン類混合物	液体	小	AM
アルカリ増粘剤	液体	中	AL
セルロース系増粘剤	粉体	大	SEL

表-4 混和剤の添加量

増粘剤	AM (C×%)	AL (C×%)	SEL (g/m ³)
なし	0	0	0
AM	1.0	0	0
AL	0	0.03	0
SEL	0	0	60*

*モルタルに添加する場合は、セメント重量当たりの使用量をコンクリートと同一とした。

表-5 モルタルの調合（シリーズ1）

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)			SP (C×%)
		W	C	S	
35	2.96	257	468	1384	1.1
45	2.27	257	572	1298	1.3~1.5*
55	1.58	257	735	1163	1.6~2.0*

*適切なフレッシュ性状が得られるように使用増粘剤ごとに調整した。

軽量骨材への加圧吸水について評価するため、加圧ブリーディング試験（排水法）にて、脱水量を測定した。加圧ブリーディング試験はコンクリート標準示方書「加圧ブリーディング試験方法（案）（JSCE-F 502-2018）⁶⁾」を参考に行った。

(3) 密閉法による加圧後の軽量骨材の吸水量の測定

密閉法による加圧後の軽量骨材の吸水量は、日本建築学会編「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」の付3「圧送したコンクリート中に含まれる粗骨材の吸水率の変化の試験方法⁷⁾」に準じて測定した。測定はコンクリート加圧前後の2回とした。

実際のポンプ圧送を模擬するため、加圧ブリーディング試験と同一の要領で、排水をせずに加圧を行った。加圧力と加圧時間は①1.5MPa-120秒、②3.5MPa-120秒、③3.5MPa-300秒の3水準とした。

3.4 シリーズ3

(1) 測定対象

シリーズ3で使用するコンクリートはシリーズ2と同様とする。LGのロットが異なるため、再度表-8に調査を示す。測定対象は表-3に示すAL、SELの増粘剤を表-8に示す軽量コンクリートの調合に添加したものと増粘剤なしの計3水準の軽量コンクリートとした。なお、増粘剤なしの普通コンクリートも比較のために設定した。

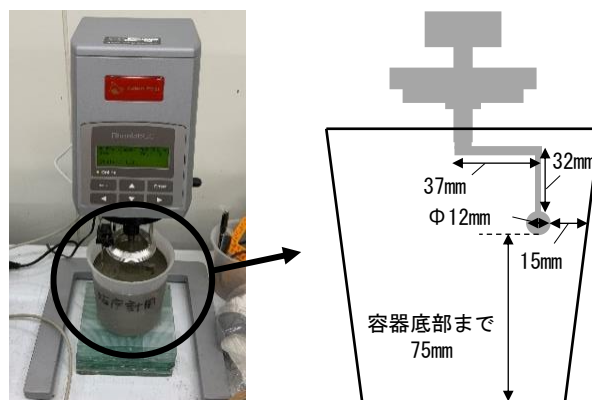


図-2 回転粘度計の各部の寸法

表-6 コンクリートの調合（シリーズ2）

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	HG	LG
軽量	50	50.3	175	350	872	—	426*

*LGは絶乾状態における重量を示す。

表-7 練上がり時のフレッシュ性状（シリーズ2）

種類	使用増粘剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	SP (C×%)
軽量	なし	21.5	3.5	0.6
	AM	22.0	6.3	0.6
	AL	22.5	6.0	0.6
	SEL	22.0	6.0	0.6

各コンクリートの練上がり時のフレッシュ性状を表－9に示す。

(2) コンクリートの加圧方法

軽量コンクリートの加圧は、図－3 に示すように配管内でシリンダ油圧により行った。装置のスペックおよび加圧方法を表－10 に示す。配管長さは 1000mm、配管径は 100A (4B)、シリンダ径は内径 63mm、管内圧力は 1.5MPa とした。配管を立てた状態で練上がり直後のコンクリートを詰め、その後配管を水平に設置し、120 秒間加圧を行った。

(3) 配管内加圧後の軽量骨材の吸水率の測定

配管内加圧後の軽量骨材の吸水率は、3.3 (3)と同様とした。測定はコンクリート加圧前後の 2 回とした。

(4) スランプロス

コンクリートのスランプロスは JIS A 1101「コンクリートのスランプロス試験方法」に準じて測定した。経時による流動性の低下の影響を除外するため、コンクリート練上がり後に、加圧するコンクリートとは別の試料を静置しておき、加圧後のコンクリートのスランプロス試験と同時にこの試料のスランプロス試験も行った。これら 2 つのスランプロスの差をスランプロスとして算出した。

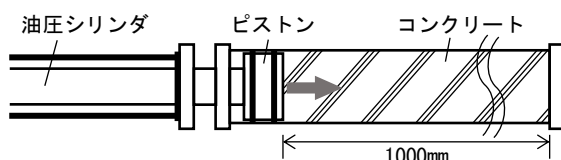
表－8 コンクリートの調合 (シリーズ 3)

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
			W	C	S	HG	LG
普通	50	49.5	175	350	858	916	—
軽量	50	50.3	175	350	872	—	442*

*LG は絶乾状態における重量を示す。

表－9 練上がり時のフレッシュ性状 (シリーズ 3)

種類	使用増粘剤	スランプロ (cm)	空気量 (%)	SP (C×%)
普通	なし	21.5	4.3	0.9
軽量	なし	22.0	2.6	0.95
	AL	21.5	4.8	0.95
	SEL	21.5	3.9	0.95



図－3 配管内でのシリンダ油圧による加圧

表－10 装置のスペックおよび加圧方法

項目	内容
配管径	内径 100mm : 100A (4B)
配管長さ	1,000mm
シリンダ径	内径 63mm
管内圧力	1.5MPa
加圧開始時間	練り混ぜ直後
加圧時間	120 秒

4. 実験結果と考察

4.1 シリーズ 1

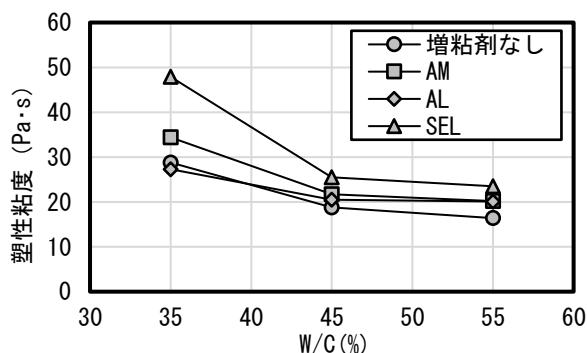
(1) 回転粘度計の測定結果

回転粘度計を用いて算出した塑性粘度とモルタルの W/C の関係を図－4 に示す。W/C35%では各増粘剤において塑性粘度が最も大きくなり、SEL の塑性粘度が 47.9Pa・s と最も大きくなった。W/C45%, 55%では塑性粘度は少し小さくなり、使用増粘剤による差異も小さくなるものの、SEL の塑性粘度が W/C45%で 25.5 Pa・s, W/C55%で 23.5 Pa・s と各増粘剤の中で最も大きくなった。AM や AL の塑性粘度はいずれの W/C においても増粘剤なしと同等か少し上回る程度であった。

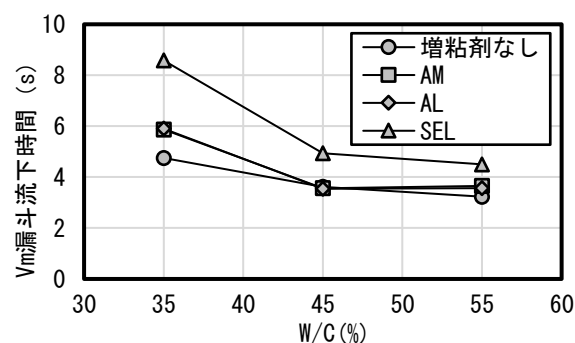
(2) Vm 漏斗流下試験での流下時間

Vm 漏斗流下試験での流下時間とモルタルの W/C の関係を図－5 に示す。前項と同様、W/C35%では各増粘剤において流下時間が最も長くなり、SEL の流下時間が 8.6s と最も長くなった。W/C45%, 55%では流下時間は少し短くなり、使用増粘剤による差異も小さくなるものの、SEL の流下時間が W/C45%で 4.9s, W/C55%で 4.5s と各増粘剤の中で最も長くなった。AM や AL の流下時間はいずれの W/C においても増粘剤なしと同等か少し上回る程度であった。

以上 2 つの測定より、W/C に関わらず、SEL を使用した場合に最も高い粘性が得られることが分かった。また、AM や AL については回転粘度計や Vm 漏斗流下試験に



図－4 塑性粘度と水セメント比の関係



図－5 Vm 漏斗流下時間と水セメント比の関係

よる測定で有意な差が確認できるほどの高い粘性は得られないが、増粘剤なしのものと比較して若干粘性が大きくなることが確認できた。これにより、添加する増粘剤の種類によってコンクリートの粘性を制御できることが示された。

4.2 シリーズ 2

(1) 排水法による加圧後の脱水量

加圧ブリーディング試験（排水法）における脱水量と経過時間の関係を図-6 に示す。増粘剤なしの場合、最終脱水量が 118.7g であるのに対し、AM では 113.5g, AL では 119.1g, SEL では 114.9g となり、増粘剤の使用、種類に関わらず全水準で同様の傾向となった。4.1 で確認された粘性の差異は、加圧ブリーディング試験による脱水量には影響を及ぼさないものとする。

(2) 密閉法による加圧後の軽量骨材の吸水量

各加圧条件における加圧前に対する加圧後の軽量骨材の含水率の増分を図-7 に示す。どの加圧条件でも同様の結果となり、増粘剤なしで最も大きく 1.6~1.7%, 次いで AM で 0.7~1.1%, AL で -0.1~0.4%, SEL で -0.3~0.2% となり、増粘剤の種類によって軽量骨材への加圧吸水量が変化することが分かった。なお、AL, SEL において、一部加圧後の軽量骨材の含水率の増分が 0 を下回る

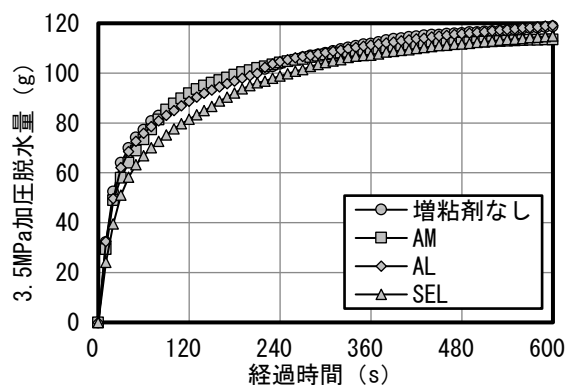


図-6 加圧ブリーディング試験における脱水量と経過時間の関係

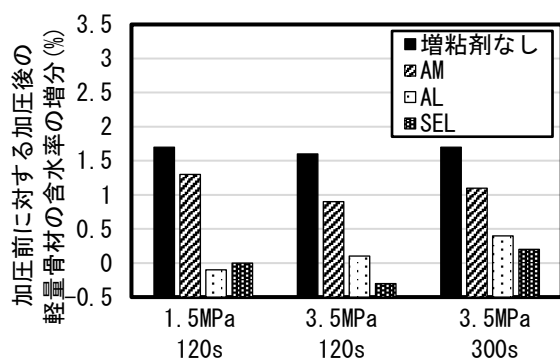


図-7 各加圧条件における加圧前に対する加圧後の軽量骨材の含水率の増分

が、これは測定のばらつきによるものとする。

図-4 と図-7 で得られた結果から導いた、加圧前に対する加圧後の軽量骨材の含水率の増分と増粘剤なしに対する塑性粘度の増分の関係を図-8 に示す。塑性粘度の増分は AM で 0.5%, AL で 1.7%, SEL で 6.9% となった。粘性が大きいと加圧後の含水率の増分が小さくなる傾向となり、増粘剤によりコンクリート内の水分の粘性が大きくなったことで、軽量骨材への加圧吸水が抑制されたものとする。このことから、コンクリートの粘性と軽量骨材への加圧吸水量には相関関係があり、増粘剤の使用によりコンクリートの粘性を操作することで、軽量骨材への吸水量を制御できる見通しを得た。

4.3 シリーズ 3

(1) 軽量骨材への加圧吸水による流動性低下の確認

増粘剤なしの調合の場合、軽量コンクリートの加圧時に軽量骨材の加圧吸水により流動性が低下することを同条件の普通コンクリートと比較することで確認した。

普通コンクリートと軽量コンクリートの加圧なしと加圧後（1.5MPa-120 秒）のスランプを図-9 に示す。普通コンクリートでは、加圧なしで 21.5cm, 加圧後で 21.0cm であるため、加圧後のスランプロスは 0.5mm となった。一方、軽量コンクリートでは、加圧なしで 22.0cm,

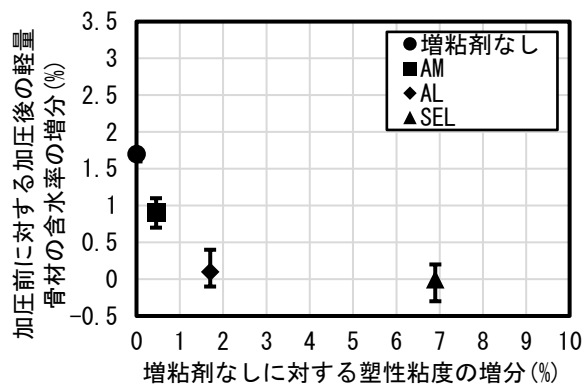


図-8 加圧前に対する加圧後の軽量骨材の含水率の増分と増粘剤なしに対する塑性粘度の増分の関係

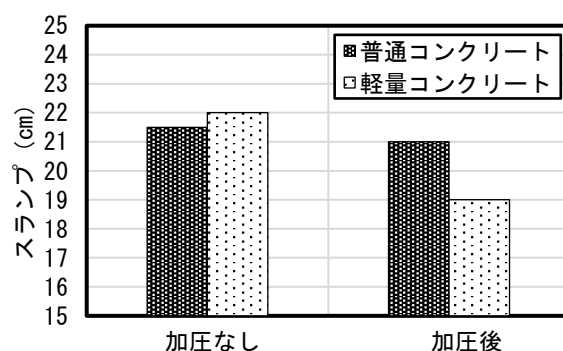


図-9 普通コンクリートと軽量コンクリートの加圧なしと加圧後のスランプ

表-11 配管内加圧後のスランプの変化

使用増粘剤	スランプ (cm)	
	加圧なし	加圧後
増粘剤なし	22.0	19.0
AL (粘性 中)	22.5	20.5
SEL (粘性 大)	21.5	20.0

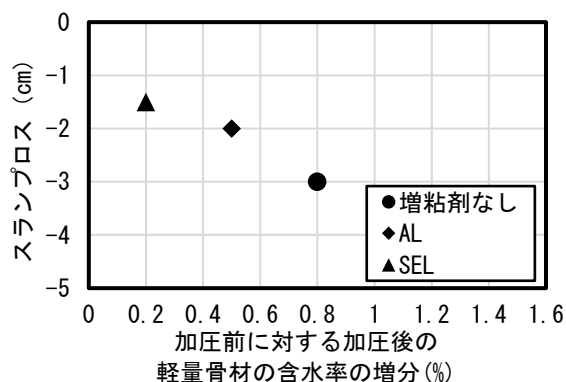


図-10 加圧後のコンクリートのスランプロスと加圧前に対する加圧後の軽量骨材の含水率の増分の関係

加圧後で 19.0cm であるため、加圧後のスランプロスは 3.0cm となり、軽量骨材使用時の方が、加圧後にスランプロスが大きくなった。よって、軽量骨材への加圧吸水作用により、軽量コンクリートの流動性が低下する現象を確認できた。

(2) 配管内加圧後のスランプロスと軽量骨材への加圧吸水量

配管内加圧 (1.5MPa-120 秒) 後の軽量コンクリートのスランプの変化を表-11 に、配管内加圧後のスランプロスと軽量骨材の加圧前に対する加圧後の軽量骨材の含水率の増分の関係を図-10 に示す。増粘剤なしでは、加圧後の軽量骨材の含水率の増分は 0.8%と最も大きくなった。一方、増粘剤を使用した場合、加圧後の軽量骨材の含水率の増分は、SEL では 0.2%、AL では 0.5%となり、増粘剤の使用により軽量骨材の加圧吸水量を低減できることを確認した。なお、加圧前に対する加圧後の軽量骨材の含水率の増分を図-8 と比較すると、シリーズ 2 とシリーズ 3 の結果では少し差異が見られる。これは人工軽量骨材のロットや SP の添加量が異なることによる差異であると考えられる。

また、増粘剤なしの場合の軽量コンクリートのスランプは加圧なしで 22.0cm に対し加圧後 19.0cm となり、スランプロスは 3.0cm となった。一方で、AL では加圧なしで 22.5cm に対し加圧後 20.5cm となりスランプロスは 2.0cm、SEL では加圧なしで 21.5cm に対し加圧後 20.0cm となりスランプロスは 1.5cm であった。軽量骨材の含水率の増分が大きくなるほどスランプロスも大きくなるため、加圧後の軽量コンクリートのスランプロスと軽量骨

材の加圧吸水量には相関関係があることが分かった。これにより、圧送後の軽量骨材の加圧吸水量を測定することで、圧送後のコンクリートの流動性の低下を評価できる見通しを得た。

以上をまとめると、先述の通り、軽量骨材への加圧吸水量は粘性で制御可能であり、軽量骨材への加圧吸水量により加圧後のスランプロスを評価できる。このことから、増粘剤を用いて粘性を操作することで、軽量コンクリートの圧送性を改善できるものとする。

5. まとめ

本研究の範囲内において以下の知見を得た。

- 1) 添加する増粘剤の種類によってコンクリートの粘性を制御できる。
- 2) 軽量コンクリートの粘性の差異は、加圧ブリーディング試験 (排水法) による脱水量には影響を及ぼさない。
- 3) コンクリートの粘性が大きいと、加圧後の軽量骨材の含水率の増分が小さくなる傾向がある。
- 4) 加圧後の軽量骨材の含水率の増分が大きいと、加圧後のスランプロスが大きくなる傾向がある。
- 5) 増粘剤を用いて粘性を操作することで、軽量コンクリートの圧送性を改善できる。

参考文献

- 1) 米澤敏男, 吉岡保彦, 岩清水隆, 阪上邦夫: 軽量コンクリートのポンプ圧送に用いる圧力吸水抑制剤に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.25-30, 1987
- 2) 平石剛紀, 横関康祐, 坂田昇, 上杉祥文: 特殊増粘剤を使用した軽量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.26, No.1, pp.1575-1580, 2004
- 3) 橋本貴之, 梁俊, 坂本淳, 丸屋剛: 加圧履歴に基づいたポンプ圧送性の室内試験評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1143-1148, 2018
- 4) 神代泰道, 植松俊幸, 一瀬賢一: 施工性を考慮した軽量コンクリートの調査条件に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1627-1632, 2009
- 5) 浜田大輔, 濱井利正, 下田政朗, 正中雅文: フレッシュコンクリートの作業性を追求した新規高性能減水剤, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.185-190, 2006
- 6) 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
- 7) 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