

[1005] 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

正会員 ○ 米澤敏男 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 吉岡保彦 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 岩清水隆 (竹中工務店技術研究所)
 阪上邦夫 (三洋化成工業研究本部)

1. まえがき

ポンプによるコンクリートの打設は、コンクリートの効率的な打設方法として広く普及しており、軽量コンクリートの場合もポンプで打設されることが多い。容積で40～50%の空隙を含む多孔体である人工軽量骨材は、圧送時の高圧力によりコンクリート中の水を吸水（圧力吸水）する。その結果、コンクリートの流動性が低下し、ポンプ圧送が難しくなる。この圧力吸水を少なくするために、ポンプ施工される軽量コンクリートに用いる軽量骨材は、製造工場であらかじめ吸水させる（プレウエッチング）とともに、コンクリートの単位水量を大きくし、必要に応じて流動化剤を用いることにより施工される。しかし、プレウエッチングした軽量骨材を用いたコンクリートは、凍結融解作用に対する抵抗性が極めて低く、北極洋に建設される石油プラットホームや寒冷地に建設される土木構造物等には適用することが困難である。また、ポンプ圧送のために軽量コンクリートの単位水量が、大きくなる傾向にあることもコンクリートの品質上は望ましくない。したがって、軽量骨材のポンプ施工時の圧力吸水をプレウエッチングによらない方法で抑制することができれば、ポンプ施工される軽量コンクリートの適用分野の拡大と品質の向上に寄与すると考えられる。

この研究は軽量骨材表層部の空隙に高粘性層を形成することを原理とする、絶乾骨材を用いた軽量コンクリート用の圧力吸水抑制剤（以下「抑制剤」と略記する）の基本的性質を、圧力吸水試験、力学的特性試験およびポンプ圧送実験の結果から考察したものである。

2. 圧力吸水抑制剤の概要

研究の対象とした抑制剤は、図-1に示す構造式を有し、5～6のpH域で数センチポアズの粘性を有するポリカルボン酸型アクリル樹脂エマルジョンである。このアクリル樹脂は、3～5μmの分子長を有する線状高分子であるが、5～6のpH域では、この線状高分子が渦巻き状になったり、からまったりして径0.1～0.2μmの粒子として乳化されている。図-2は、この抑制剤にNaOHを添加してpHを高めた時の粘度の変化をブルックフィールド粘度計により測定した結果を示すが、この抑制剤の粘度は、pHを中性ないしはアルカリ性に高めると著しく増大する。これは、pHの上昇により抑制剤が解乳化し、粒子として分散していたものが、もとの長い線状高分子に戻り、分子相互が干渉し合うためである。5～6のpH域では、この抑制剤は、低い粘度

$R_1, R_2: H \text{ または } CH_3 \quad R_3: CH_3 \sim C_4H_9$

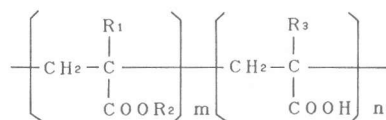


図-1 抑制剤の構造式

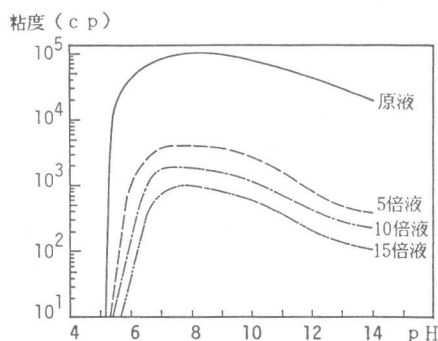


図-2 抑制剤の粘度とpHの関係

と小さな粒子径のために軽量骨材表層部の微細な空隙に比較的容易に浸透しうる。浸透後 pH を上昇させると、この抑制剤は解乳化し、軽量骨材表層部の空隙に粘度の著しく高い水の層が形成される。この抑制剤の圧力吸水抑制作用は、軽量骨材表層部の空隙に形成される高粘性層に由来する。抑制剤が軽量骨材の表層に浸透した後に粘度上昇のために必要とされる pH の上昇は、セメントから放出される OH^- により容易に達成される。

表－１ 軽量粗骨材の物理的性質

種類	絶乾比重	24時間吸水率 (%)	単位容積重量 (t/m^3)	実積率 (%)	40 t 破砕値 (%)	浮粒率 (%)	粗粒率
ES	1.24	9.5	0.80	64.6	35	0.5	6.42
FA	1.32	2.1	0.81	61.8	49	0.0	6.39

３．実験

３．１ 実験の概要

膨張頁岩焼成人工軽量骨材（ES と略記する）

およびスライアッシュ焼成人工軽量骨材（FA と略記する）を用いて次の４項目について実験を行い、抑制剤の基本的性質を調べた。

- (１) 抑制剤の濃度と添加量が、抑制処理した骨材の圧力吸水特性に及ぼす影響
- (２) 抑制処理した骨材の圧力吸水と同骨材のコンクリート中での圧力吸水の差異
- (３) 抑制剤がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響
- (４) 抑制処理した骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性

３．２ 使用材料

- (１) セメント：O社製普通ポルトランドセメントを使用した。ポンプ圧送実験ではU社製普通ポルトランドセメントを使用した。
- (２) 軽量粗骨材：S社製の膨張頁岩焼成人工軽量骨材（ES）およびU社にて試作したフライアッシュ焼成人工軽量骨材（FA）を使用した。これらの物理的性質を表－１に示す。
- (３) 細骨材：大井川産川砂（比重2.62，吸水率1.35%，FM2.80）を使用した。ポンプ圧送実験では、若松産海砂（比重2.51，吸水率1.25%，FM2.20）と白野江産砕砂（比重2.63，吸水率1.06%，FM3.98）を等量混合した混合砂を使用した。
- (４) 混和剤：高性能減水剤（高縮合芳香族スルホン酸塩系）と流動化剤（高縮合環式スルホン酸塩系）を用いた。ポンプ圧送実験ではAE減水剤（有機酸系誘導体）と流動化剤（アルキルアリスルホン酸高縮合物）を用いた。

３．３ 実験計画と実験方法

- (１) 抑制剤の濃度と添加量が骨材の圧力吸水特性に及ぼす影響の実験（実験－Ⅰ）

表－２に実験因子と水準を示す。軽量骨材は、３．２で述べた二種類を、抑制剤の濃度は表－２に示す４水準を試験した。また抑制剤の添加量は、軽量骨材ESでは表中に示す３水準を、軽量骨材FAでは表中に示す４水準を試験した。

骨材の圧力吸水抑制処理においては、まず絶乾重量3kgの骨材に所定濃度の抑制剤を所定量添加し、オムニミキサー（10ℓ）中で1分間攪拌し、抑制剤を骨材の表層に浸透させた。その後、骨材絶乾重量の2%のセメントを添加してさらに1分間攪拌し、pH上昇により抑制剤を増粘させた。この骨材を図－３に示す圧力吸水試験機の圧力容器の中に入れ容器を水で満たした後、試験機上部のジャッキを用いて加圧した。骨材

の吸水量は、1/100mm ダイアルゲージで読み取るラムの変位から測定した。なお、加圧による容器の変形が、ラムの変位に及ぼす影響は、容器中に水のみを入れて加圧し

表－２ 実験－Ⅰの因子と水準

因 子		水 準		
骨材の種類		(1)骨材ES	(2)骨材FA	
抑制剤の濃度		(1)5倍液	(2)7.5倍液	(3)10倍液
		(4)15倍液		
抑制剤の添加量 (対骨材の絶乾重量)	骨材ES	(1)2.5%	(2)3.2%	(3)4.0%
	骨材FA	(1)0.6%	(2)1.0%	(3)1.5% (4)2.0%

た時のラムの変位により補正した。試験時の圧力は、30秒間かけて35kg/cm²まで直線的に増加させた後、4.5 分間その値に保持し、その後直ちに圧力を除いた。

(2) 処理した骨材の圧力吸水と同骨材のコンクリート中での圧力吸水の比較実験（実験－Ⅱ）

コンクリート練り混ぜによる物理的・化学的作用が、抑制剤の効果に及ぼす影響を調べるために、抑制処理を行った骨材のコンクリート中での圧力吸水特性を、処理した骨材に直接加圧した時の吸水特性および無処理骨材の圧力吸水特性と比較した。骨材の抑制処理には10倍に希釈した抑制剤を用い、この希釈した抑制剤を軽量骨材ESでは骨材絶乾重量の3.2%，FAでは1.5%添加した。この抑制処理は、50ℓ傾胴ミキサーにより行った。試験にはブレンコンクリートを用いた。コンクリートの配（調）合を表－3に示す。コンクリートの練り混ぜには50ℓ強制練りミキサーを用い練り混ぜ時間は2分間とした。

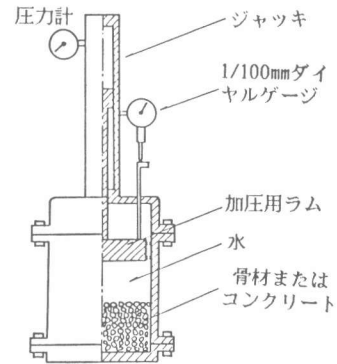
コンクリートの圧力吸水試験には、骨材に直接加圧した場合と同様、図－3に示す圧力吸水試験機を使用した。この試験で得られるコンクリートの圧力吸水曲線をコンクリート中の空気量の圧縮量を考慮して補正し、コンクリート中での軽量骨材の圧力吸水曲線を求めた。コンクリートの空気量は容積法で測定した。

(3) 抑制剤がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響の実験（実験－Ⅲ）

表－4に示す配（調）合を有する水セメント比30%の高強度軽量コンクリートを用いて抑制処理がコンクリートの圧縮強度と静弾性係数に及ぼす影響を調べた。軽量骨材ESの場合には抑制剤の添加量を骨材絶乾重量の3.2%とし、抑制剤の濃度を5倍希釈液、10倍希釈液、15倍希釈液に変化させた時の処理骨材を用いたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数を無処理骨材を用いたコンクリートと比較した。また軽量骨材FAの場合には抑制剤の添加量を1.5%とし、骨材ESの場合と同様に抑制剤の濃度を三水準に変化させて試験した。なお骨材の抑制処理とコンクリートの練り混ぜ方法は、実験－Ⅱと同様である。

(4) 抑制処理した骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送実験（実験－Ⅳ）

軽量骨材FAを用いた水セメント比40%，単位水量168kg/m³のコンクリート（表－5に配（調）合を示す）を用いてポンプ圧送実験を行い、抑制処理した骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性を調べた。図－4に実験に用いたコンクリートポンプ（IHI－100B型）と圧送管（5インチ管）の配置を示す。配管の水平換算



図－3 圧力吸水試験装置

表－3 コンクリートの配（調）合（実験－Ⅱ）

骨材の種類	スラブ（cm）	Air（%）	W/C（%）	s/a（%）	単位量（kg/m ³ ）			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
ES	10	2	40	39	185	463	663	495
FA	10	2	40	39	185	463	663	527

表－4 コンクリートの配（調）合（実験－Ⅲ）

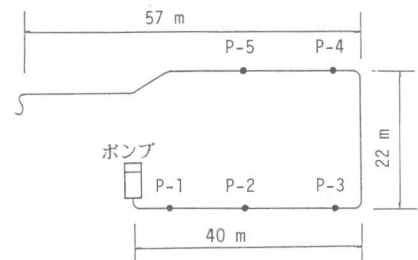
骨材の種類	スラブ（cm）	Air（%）	W/C（%）	s/a（%）	単位量（kg/m ³ ）			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
ES	15	5	30	31	144	480	524	568
FA	15	5	30	31	144	480	524	605

（注）高性能減水剤（NL1450）、流動化剤（NP20）および空気量調整剤（Poz.No202）を所要量使用した。

表－5 コンクリートの配（調）合（実験－Ⅳ）

骨材の種類	スラブ（cm）	ベース	流動化（%）	Air（%）	W/C（%）	s/a（%）	単位量（kg/m ³ ）			
							水	セメント	細骨材	粗骨材
FA	15	21	6	40	40	40	168	410	635	523

（注）AE減水剤（EX20）、空気量調整剤（AE200）、および流動化剤（HF）を所要量使用した。



図－4 コンクリートポンプと圧送管の配置

長は、約160mである。この実験では圧送中の管内圧分布を測定するとともに、圧送前後のコンクリートのスランプ、空気量、圧縮強度の変化および骨材の吸水率の変化を調べた。圧送前後のコンクリートの性質の差は、ポンプの吐出量 $20\text{ m}^3/\text{h}$ の時に測定した。

また管内圧の分布は、吐出量 $20, 30, 40\text{ m}^3/\text{h}$ の三水準に変化させて測定した。

4. 実験結果と考察

4. 1 抑制剤の濃度と添加量が骨材の圧力吸水特性に及ぼす影響（実験-I）

10倍に希釈した抑制剤で処理した骨材の圧力吸水曲線を図-5に示す。骨材E Sの場合、抑制剤で処理を行わない骨材は加圧開始後ただちに吸水量は増大し約29%（骨材絶乾重量比）に達した後この値を保持した。これにたいして、抑制剤で処理を行った場合、吸水量の増加は、ゆるやかであり、加圧開始後5分においても12~16%程度であった。骨材F Aの場合、抑制処理を行わなくても加圧開始後5分の吸水量は約12%であり、この骨材自体が極めて圧力吸水の低い骨材であることがわかる。この骨材を抑制処理すると圧力吸水は、さらに低下し、抑制剤の添加量1.5%ないしは2.0%では、加圧後5分で3~4%と極めて小さな値となった。これらの結果は、試験した抑制剤が軽量骨材の圧力吸水を相当低下し得ることを示している。

図-6と図-7は、圧力吸水試験により得られた5分加圧後の吸水量と抑制剤の添加量との関係を示したものである。骨材E Sの場合、抑制剤の添加量を2.5%から3.2%に増加させると吸水量は低下したが、添加量をさらに4.0%まで増加させても吸水量の低下は、あまり見られなかった。骨材F Aの場合、抑制剤の添加量1.5%までは、添加量の増加に応じて吸水量も低下したが、添加量を1.5%より増加しても吸水量の低下は見られなかった。このように骨材E S, F Aいずれの場合にも、抑制剤の添加量を増加しても骨材の吸収量は低下しなくなる点が存在する。この添加量は、抑制処理における抑制剤の適正な添加量と考えられる。また、この添加量は、目視によって骨材の全表面に抑制剤が行きわたる量に比較的近い値であった。いっぽう、抑制剤の濃度と吸水量との関係では、濃度が低いと吸水量は増加する傾向は見られるが、両者は必ずしも比例していない。抑制剤の濃度を10倍液程度に希釈しても吸水量は、大きく変わらないようであり、実用的には10倍液程度が適当な濃度と考えられる。

4. 2 処理した骨材の圧力吸水と同骨材のコンクリート中での圧力吸水の比較（実験-II）

10倍に希釈した抑制剤を骨材E Sでは3.2%, F Aでは1.5%添加して抑制処理を行った骨材のコンクリート中での圧力吸水曲線を、抑制処理した骨材に直接加圧した時の圧力吸水曲線および無処理骨材の圧力吸水曲線と比較した結果を図-8に示す。骨材E S, F Aいずれの場合も

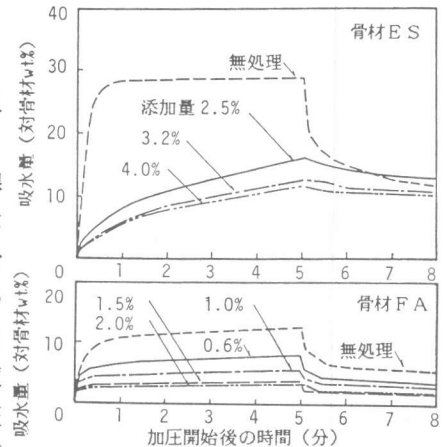


図-5 抑制処理骨材の加圧吸水曲線

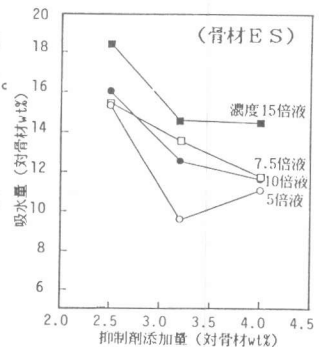


図-6 圧力吸水量と抑制剤添加量

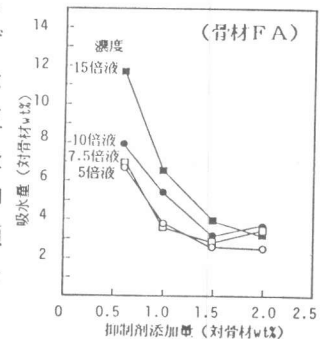


図-7 圧力吸水量と抑制剤添加量

コンクリート中で吸水量は、抑制処理した骨材に直接加圧した場合と無処理骨材に加圧した場合の中間の値を示した。すなわち、抑制剤の効果は、コンクリート中では処理した骨材に直接加圧する場合よりも低下することになる。これは、抑制処理を行った時に骨材中に浸透せず骨材の表面に残留した抑制剤の一部が骨材に直接加圧した時には圧力吸収低減に寄与していたものが、コンクリート中では練り混ぜ時の機械的作用のためにこの寄与を失ったことによると考えられる。すなわち、骨材表面に残留した抑制剤は、練り混ぜ時にコンクリート中へ拡散してしまい、コンクリート中の骨材に対する抑制剤の効果は、骨材表層に浸透したもののみによることになる。骨材表層へ浸透した抑制剤の作用は、骨材F Aの場合について言えば、処理を行った骨材のコンクリート中での吸水量と無処理骨材の吸水量との差約4%となる。この差は、コンクリート中の粗骨材量を 500 kg/m^3 とすれば、 20 kg/m^3 の水量に相当するが、これはポンプ圧送の可否を考えるうえで支配的となりうる水量である。

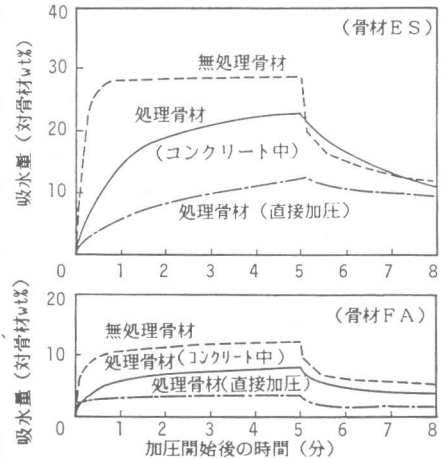


図-8 圧力吸水曲線
(コンクリート中と直接加圧の比較)

4. 3 抑制剤がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響 (実験-Ⅲ)

抑制剤3.2%を添加して処理した骨材E Sを用いた高強度の軽量コンクリート ($W/C=30\%$) の圧縮強度および静弾性係数と抑制剤の濃度との関係を図-9に示す。抑制剤を1.5%添加して処理した骨材F Sを用いた高強度の軽量コンクリートの試験結果を図-10に示す。骨材E Sの場合、3.2%添加した抑制剤の濃度を15倍液から5倍液まで高めても、コンクリートの圧縮強度と静弾性係数はほとんど変わらなかった。これに対して骨材F Aでは、抑制処理を行うことによりコンクリートの圧縮強度は10~15%、静弾性係数は5~10%の低下を示した。二つの骨材で抑制剤の添加がコンクリートの強度と弾性係数に及ぼす影響に差異が見られる理由は明らかではないが、骨材F AはE Sに比べて、もともとかなりの高強度を発現しており、この骨材特有の高強度発現の機構が抑制剤により妨げられていることが考えられる。ただし、この高強度発現の機構は、現時点で必ずしも明らかではない。もっとも、骨材F Aを用いたコンクリートの強度が抑制剤により低下するとは言え、その強度は骨材E Sを用いたコンクリートよりは高いレベルにあり、骨材F Aに抑制剤を用いた時の強度低下が実用上の障害になるとは言えない。

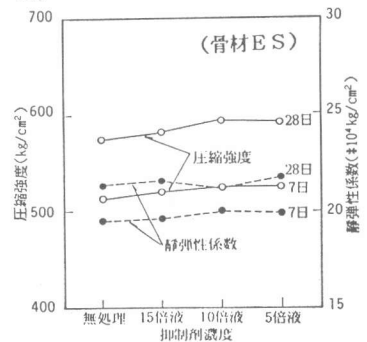


図-9 圧縮強度と静弾性係数

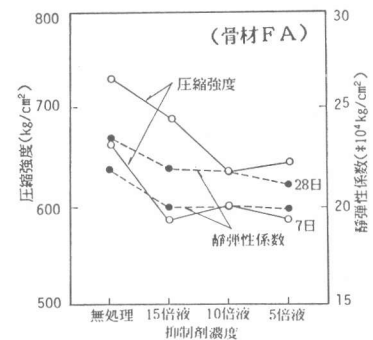


図-10 圧縮強度と静弾性係数

4. 4 抑制剤で処理した骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送実験 (実験-Ⅳ)

抑制剤で処理した骨材F Aを用いたコンクリート ($W/C=40\%$) は、絶乾の軽量骨材を用いており、しかも 168 kg/m^3 という低い単位水量であるにもかかわらずポンプ圧送可能であった。また同一配(調)合で無処理骨材を用いたコンクリートは、圧送困難であった。表-1は抑

制処理した骨材F Aを用いたコンクリートのポンプ圧送前後のコンクリートの性質の差を示す。圧送前のコンクリートは、スランブ14.5cmであったものを流動化し、スランブを23cmとしたものであったが、圧送後のスランブは18cmに低下した。これは、圧送前後の骨材の吸水率の差約2%からわかるように圧送により骨材が吸水し、モルタル中の水量が減少したことによる。また空気量は、圧送により0.5%低下した。圧送後のコンクリートの圧縮強度は、圧送前に比べて20%程度高くなったが、これは粗骨材の吸水による水セメント比の低下と空気量の減少によると考えられる。

図-11は、圧送中の管内圧分布の測定結果を示す。測点P₁の圧力は、吐出量によらず38~40kg/cm²を示したが、P₂~P₅では、吐出量の高い方が圧力が小さくなる傾向を示した。これは吐出量の差による圧送中の骨材への加圧時間の差が骨材の吸放水のプロセスに影響し、それが管内圧に現れたものと推定される。また管内圧の分布が下に凸の形を示す傾向にあるのも、骨材の吸水放水の影響によると考えられる。管内圧分布にみられるこれらの特性と先に述べた圧送前後の圧縮強度の差（強度増）は、抑制処理した絶乾の骨材F Aを用いたコンクリートのポンプ圧送における特徴である。

表-6 圧送前後のコンクリートの性質の差

項 目	圧送前	圧送後
スランブ (cm)	23.0	18.0
空気量 (%)	6.0	5.5
粗骨材の吸水率 (%)	1.9	4.0
材令28日の圧縮強度 (kg/cm ²)	339	415

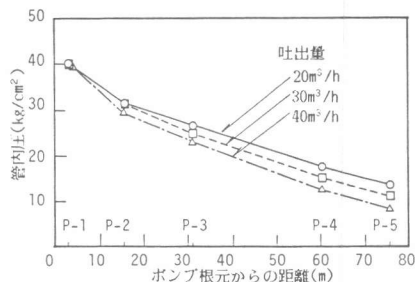


図-11 管内圧力分布の測定値

5. 結 論

絶乾の軽量骨材を用いた軽量コンクリートのポンプ圧送を目的として開発された圧力吸水抑制剤の基本的性質について以下の結論を得た。

- (1) 抑制剤の作用は、同抑制剤の濃度と添加量により変化するが、ある添加量以上では添加量を増しても圧力吸水抑制作用が増加しなくなる。その添加量は、骨材E Sでは骨材絶乾重量の3%強、骨材F Aでは1.5%程度である。
- (2) 抑制剤の作用は、骨材表層に浸透した同抑制剤の高い粘性によるが、抑制処理した骨材に直接圧力を加える時には、みかけ上骨材表面に残留する抑制剤も圧力吸水低減に寄与している。しかし表面に残留する抑制剤の作用は、コンクリート練り混ぜ時の機械的作用により失われる。
- (3) 抑制処理を行った骨材を用いたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数は、骨材E Sの場合には、無処理骨材を用いたコンクリートとほとんど変わらないが、骨材F Aの場合には、ある程度の低下（5~15%）が見られる。
- (4) 抑制剤で処理した骨材F Aを用いたコンクリート（W/C=40%，単位水量=168kg/m³）は、絶乾の骨材を用いたものであるが、ポンプ圧送可能であった。また、抑制処理をした絶乾の骨材F Aを用いたコンクリートは、圧送時にある程度の吸水を伴うため、圧送中特有の管内圧分布や、圧送前後の圧縮強度の差（強度増）を示す。

〔謝辞〕この研究に用いた軽量骨材F Aに関して宇部興産㈱より様々のご援助をいただいた。圧送実験においては、竹本油脂㈱のご協力をいただいた。紙面を借りて感謝の意を表します。また、この抑制剤の開発と研究は、筆者らの他に、㈱竹中工務店、近藤寛寿氏、小出昭雄氏、三洋化成工業㈱、中瀬哲夫氏等により実施されたものであることを付記しておく。