

論文 高性能軽量骨材の吸水特性がコンクリートのポンプ圧送に及ぼす影響

石川 雄康*¹・児玉 明彦*²・坂田 昇*³・柳井 修司*⁴

要旨:最近開発された従来の軽量骨材に比べて吸水率の小さい高性能軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリートのポンプ圧送試験を行い圧送可能な配合を見出した。そして、この結果をもとにポンプ圧送を想定した室内レベルでの加圧実験を行い、骨材の含水率およびコンクリートの配合を因子に採って、加圧前後のフレッシュ性状の変化を調べた。その結果、骨材への吸水量の増減に影響する因子である単位粗骨材量および骨材の含水状態が加圧前後のコンクリートのスランプの変化に影響を与えることがわかった。また、高性能A E減水剤の量もスランプの変化に大きく影響を与えることがわかった。

キーワード:軽量骨材コンクリート, 高性能軽量骨材, ポンプ圧送性, 吸水特性

1. はじめに

コンクリート構造物の軽量化への要求は、近年の超高層ビル、長大スパン橋梁など高層化、長大化、大断面化の流れと、軟弱地盤への施工、揚重量の削減などから、年々高まりつつある。コンクリートを軽量化する手法として一般的には人工軽量骨材を用いられているが、ポンプ圧送性に技術的な課題を残している。すなわち、人工軽量骨材は表面に多数の開気孔を有するポーラスな材料であり吸水率が大きいので、含水率が小さい状態でのポンプ圧送ができない。そこでポンプ施工時にはプレウェッティングをして高含水率の状態にするのが一般的であるが、出荷時の含水率が20~30%と非常に大きくなり凍結融解抵抗性が小さくなる結果、その適用範囲が限られるものとなっていた。

最近、膨張頁岩を主原料とした在来の人工軽量骨材に比べて、吸水率が非常に小さくかつ高強度な人工軽量骨材¹⁾(以下、高性能軽量骨材と記す)が開発され、上記の問題を解決できる材料としての期待がかかっている。この高性能軽量骨材とは微粉碎した流紋岩系の鉱物を主原

料として発泡材および粘着材などを混合した材料を回転造粒機で造粒し、焼成して製造される人工骨材である。この焼成工程において、一旦造粒物を熔融させて脱気したあと、材料内に分散している発泡材を発泡させるため、微細に独立した閉気孔が生成されやすくなり、吸水特性および強度特性に優れる軽量骨材が製造できる。本研究では、この高性能軽量骨材を用いた軽量コンクリート(以下、高性能軽量コンクリートと記す)のポンプ圧送試験を行うとともに、ポンプ圧送を想定した室内レベルでの加圧実験でコンクリートの配合条件および骨材の含水率が加圧前後のフレッシュ性状の変化に及ぼす影響を調べた。

2. 実験概要

2.1 ポンプ圧送試験

ポンプ圧送試験に供したコンクリートの使用材料および配合条件を表-1、表-2に示す。高性能軽量粗骨材は、絶乾比重1.10、24時間吸水率2.9%のものを絶乾状態で使用した。また、高性能A E減水剤にはポリカルボン酸系のもの

*1 太平洋セメント(株) 清澄研究所 超軽量コンクリート技術グループ リーダー 工修(正会員)

*2 太平洋セメント(株) 清澄研究所 超軽量コンクリート技術グループ 研究員(正会員)

*3 鹿島技術研究所 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 主任研究員 工博(正会員)

*4 鹿島技術研究所 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 研究員 工修(正会員)

表-1 使用材料(ポンプ圧送性試験)

使用材料	種類	記号	物性または主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度3.15g/cm ³
細骨材	粗砂:岩船郡朝日村産山砂 細砂:北蒲原郡中条町産山砂 粗:細=7:3で混合(容積比)	S	表乾比重2.58, 吸水率1.71% 表乾比重2.57, 吸水率1.64% 混合後のF.M.=2.64
粗骨材	高性能軽量骨材	H A L	絶乾比重1.10 24時間吸水率2.90%
混和剤	高性能A E減水剤	S P	ポリカルボン酸系(遅延型)
	A E剤	A E	変性アルキルカルボン酸化合物

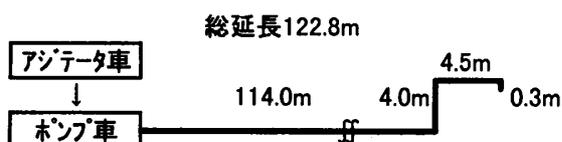


図-1 ポンプの配管

を用いた。コンクリートの配合は目標スランブ 21cm の配合と骨材の加圧吸水による流動性の低下を考慮した目標スランブフロー55cm の配合の2種類とし、W/C はいずれの配合も 40%、単位水量はそれぞれ 155kg/m³、175kg/m³とした。なお、スランブ、スランブフローおよび空気量の調整は高性能A E減水剤およびA E剤を必要量添加することで調整した。コンクリートの製造は、生コンプラントの二軸強制練りミキサ(容量 2.5m³、練混ぜ量 1.5m³/バッチ)を用いて全材料投入後、60秒間練り混ぜて行った。練り上がったコンクリート(3バッチ、4.5m³)はアジテータ車で実験現場まで運搬した。ポンプ圧送試験は、最大設計吐出量 60m³/h、最大吐出圧力 8.05N/mm²、コンクリートシリンダ径φ 205mm、ストローク長 1650mm の複列油圧ピストン式ポンプを用いて、図-1に示す総延長約 120m、125Aの配管で行った。試験項目は、表-3に示すようにポンプ圧送前後のコンクリートについて、それぞれフレッシュ性状、骨材の含水率および圧縮強度を測定した。骨材の含水率は、コンクリートを5mmのふるいの中で洗い流し、布で表面の水膜を拭いとして測定した質量と絶乾状態の質量との差から算出した。

表-2 コンクリートの配合条件

	スランブ配合	スランブフロー配合
骨材の含水状態	絶乾状態	
目標スランブ (cm)	21±1.5	—
目標スランブフロー (cm)	—	55±5
目標空気量 (%)	5±1.5%	
水セメント比 (%)	40%	
単位水量 (kg/m ³)	155	175
単位粗骨材量 (L/m ³)	350	310

表-3 試験項目(ポンプ圧送実験)

試験項目	目標値	試験方法
スランブ	21±1.5cm	JIS A 1101
スランブフロー	55±5cm	JSCE-F503-1990
空気量	5.5±1.5%	JIS A 1116
単位容積質量	—	JIS A 1128
骨材の含水率	—	コンクリートから粗骨材を洗い出し24時間以上乾燥
圧縮強度	—	JIS A 1108(標準養生材齢7, 28日)

2.2 室内加圧実験

本実験では配合条件および骨材の含水状態がポンプ圧送に与える影響を調べるために、ポンプ圧送を想定した加圧条件下におけるコンクリートの加圧前後のフレッシュ性状および硬化体性状の変化を測定した。ポンプ圧送を想定した加圧条件とは、実機でのポンプ圧送試験で圧送が可能であった目標スランブフロー55cmの配合について、圧送前後のスランブフローおよび骨材の含水率の変化がほぼ一致する条件に設定したものである。なお、実際のポンプ圧送時のコンクリートのフレッシュ性状の変化は加圧の影響ばかりでなく管壁との摩擦やせん断応力を受けるが、今回の実験は加圧のみによる影響を

表-4 使用材料(室内加圧実験)

使用材料	種類	記号	物性または主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.15g/cm^3
細骨材	粗砂：岩船郡朝日村産山砂	S 1	表乾比重2.58, 吸水率1.71%
	細砂：北蒲原郡中条町産山砂	S 2	表乾比重2.57, 吸水率1.64%
粗骨材	高性能軽量骨材(15~10mm)	HAL15	絶乾比重1.10 24時間吸水率2.19% 煮沸吸水率7.23%
	高性能軽量骨材(10~5mm)	HAL10	絶乾比重0.99 24時間吸水率2.78% 煮沸吸水率10.35%
混和剤	高性能A E減水剤遅延型	S P	ポリカルボン酸系
	A E剤	A E	変性アルキルカルボン酸化合物

表-5 コンクリートの配合条件(室内加圧実験)

項目	水準
粗骨材の含水状態	絶乾, 24時間吸水, 煮沸吸水
目標スランプ(cm)	21 ± 1.5
目標空気量(%)	5.5 ± 1.5
水セメント比(%)	40
単位水量(kg/m^3)	155, 165, 175
単位粗骨材量(L/m^3)	300, 350

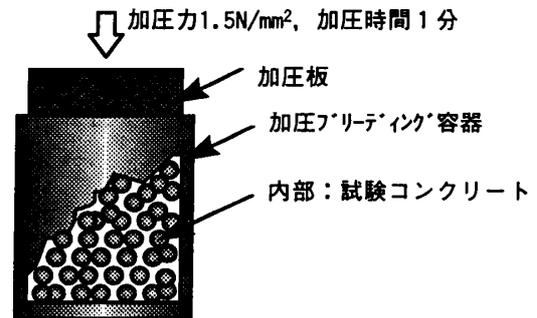


図-2 加圧実験方法

把握するために実施した。

加圧試験に用いた使用材料を表-4に示す。高性能軽量骨材はHAL15:HAL10=3:7(容積比)、細骨材はS1:S2=7:3(容積比)でそれぞれ混合して用いた。コンクリートの配合条件を表-5に示す。目標スランプは21cmとし、W/Cは40%に設定した。単位水量を 155kg/m^3 、 165kg/m^3 、 175kg/m^3 の3水準、単位粗骨材量を 300L/m^3 、 350L/m^3 の2水準、粗骨材の含水状態は絶乾状態、24時間吸水状態、煮沸吸水状態の3水準に採って実験を行い、それぞれの因子が加圧前後のコンクリートのスランプに与える影響について調べた。スランプおよび空気量は高性能A E減水剤およびA E剤を必要量添加することで調整した。なお、絶乾状態の骨材を用いる場合には練混ぜ中に吸水する水量(粗骨材の絶乾重量に対して2.1%)を練混ぜ水にあらかじめ添加した。練混ぜはパン型強制練りミキサ(容量55L)を用いて120秒間行った。練混ぜ量は40Lとした。

練り上がったコンクリートは、非排水状態とした加圧フリーディング試験装置(粗骨材の最大寸法40mm以下のコンクリート用、 $\phi 200\text{mm} \times h250\text{mm}$)を用いて加圧試験を行った。なお、加圧条件は、前述したように実機でのポンプ圧送試験で圧送が可能であった目標スランプフローおよび骨材の含水率の変化がほぼ一致する条件として加圧力 1.5N/mm^2 、加圧時間1分とした。加圧実験の概略を図-2に示す。

測定項目は、ポンプ圧送試験と同様、加圧前後のコンクリートのフレッシュ性状、骨材の含水率および圧縮強度とし、加圧前後におけるそれぞれの変化を調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 ポンプ圧送性試験

表-6に練混ぜ後および圧送前後のスランプまたはスランプフローと圧送前後の骨材の含

表-6 試験結果

コンクリートの種類	練混ぜ後のスランブ ^o およびスランブ ^o フロー ^o (cm)	圧送開始までの経過時間(分)	圧送前後のスランブ ^o およびスランブ ^o フロー ^o (cm)		圧送前後の骨材の含水率(wt%)	
			圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
スランブ ^o 配合	21.5	127	21.5	閉塞	2.29	7.45(ポンプ ^o 出口) 4.58(出口から70m)
スランブ ^o フロー ^o 配合	55.0×52.0	118	56.5×55.0	45.0×43.5	2.12	2.86
		130	58.0×57.5	48.0×45.3	2.10	3.43
		139	57.5×57.0	43.7×43.0	2.04	4.40

水率の変化を示す。温度条件を考慮に入れてかつ適量の遅延型高性能AE減水剤を使用することにより、練混ぜ後から実験現場到着後のポンプ圧送前の時点までのスランブおよびフローの経時変化を極力少なくすることができ、目標スランブ21cmの配合および目標スランブフロー55cmの配合の現場到着時点でのデータは、それぞれスランブ20.5cm、スランブフロー57.8cmとなった。なお、空気量は7%程度ではほぼ一定であった。また、スランブフロー配合の圧送前後のスランブフローを比較すると、ポンプ圧送後のコンクリートのスランブフローは圧送前より10cm程度フローロスすることがわかったが、この圧送後のコンクリートのスランブは22cm程度となり、本試験の範囲においては十分圧送が可能であった。既往の研究²⁾で、在来のプレウエッティングした人工軽量骨材コンクリートにおいても同程度のスランブロスが生じる施工事例も報告されており、高性能軽量骨材は絶乾状態で用いてもポンプ圧送できる可能性が高いと考えられる。また、スランブフロー配合の圧送前後の骨材の含水率を比較すると、圧送前の骨材の含水率が約2.1%であったのに対し、圧送後の含水率は2.9~4.4%となり、圧送の時間経過につれてやや大きくなる傾向を示したが、ピストンの前面圧は約3N/mm²と安定した状態を保っていた。また、スランブ配合は圧送後約75m搬送された箇所にて閉塞を起こした。この75m地点およびポンプの排出口付近でのコンクリートをそれぞれ採取して骨材を洗い出して含水率を

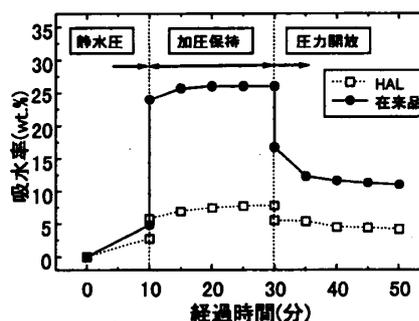


図-3 骨材の加圧吸水特性

測定した結果、ポンプの排出口付近の骨材の含水率は約7.5%とかなり大きな値となっていた。閉塞の主たる原因は、加圧により吸水率が2.3%から7.5%と約5.2%増加(単位水量換算すると約16kg/m³に相当)したためモルタル部分の水分が減少し流動性が失われたものと推察された。図-3に高性能軽量骨材および在来の膨張頁岩系軽量骨材の加圧下で測定した吸水率の経時変化を示す。この試験は、絶乾状態の骨材約1リットルを採取し10分間静水に浸水後0.75N/mm²の圧力で20分間加圧し、その水位の変化から算出した吸水率の経時変化を示したものである。この結果から、高性能軽量骨材の加圧下の吸水率は、膨張頁岩系軽量骨材より少ないものの経時的に圧力吸水し、最終的に約8%の吸水率となることがわかった。

3.2 室内加圧試験

加圧によるスランブロスの要因効果を調べるために、粗骨材の含水状態、単位水量、単位粗骨材量の3因子を採って3元配置による分散分

析³⁾⁴⁾を行った。分析結果表を表-7に示す。この結果、単位粗骨材量および粗骨材の含水状態に高度な有意差が認められた。単位粗骨材量の要因効果図を図-4に粗骨材の含水状態の要因効果図を図-5に示す。これらの図から、単位粗骨材量は少ない方が、含水状態は含水率が大きい方がよりスランプロスが低減する傾向にあることがわかった。このことは加圧力による骨材への吸水の大小がスランプロスに反映されているものと推察される。また影響が大きいと予想された単位水量に有意差が認められなかったのは以下の理由によるものと考えられる。今回の加圧実験においてはスランプ一定とするために高性能AE減水剤量を調整してスランプを目標値に合わせた。すなわち、単位水量の少ない配合ほど高性能AE減水剤を多く混入することになるが、その混入量は単位水量によって一定ではなく単位粗骨材量および骨材の含水状態によって若干異なってくる。そこで、高性能AE減水剤量の影響を調べるため、実験結果を高性能AE減水剤量とスランプロスの関係で整理して図-6に示した。また、図-7に高性能AE減水剤量と加圧後の骨材含水率の増加量の関係を示した。これらの結果より、骨材の含水状態が絶乾または24時間吸水状態の場合は、高性能AE減水剤量の増加とともに骨材への吸水が少なくなり、スランプロスが小さくなることが読み取れる。この傾向をさらに確認するために、今回の実験水準の範囲外の追加実験として、絶乾骨材を用いて実験水準よりさらに高性能AE減水剤量が多い配合(単位水量155kg/m³, 単位粗骨材量300L/m³, SP1.3%)について実験を行った結果、スランプロスが4.5cm(図-6中の追加データ)とさらに低減することがわかった。しかし、煮沸吸水状態の骨材を用いると、高性能AE減水剤量の増減がスランプロスには影響しても、含水率の変化には全く影響を及ぼしていない。このことは、スランプロスが骨材への吸水のみで生じるのではなく、高性能AE減水剤量の影響による圧力吸水特性の変化や加

表-7 分散分析表

要因	平方和	自由度	不偏分散	FO	検定
A:骨材含水率	67.361	2	33.681	13.670	**
B:単位水量	19.111	2	9.556	3.878	
C:単位粗骨材量	56.889	1	56.889	23.089	**
B×C	18.111	2	9.056	3.675	
誤差 e	24.639	10	2.464		
計	186.11	17			

注)A×B,A×Cは誤差項にプールした。

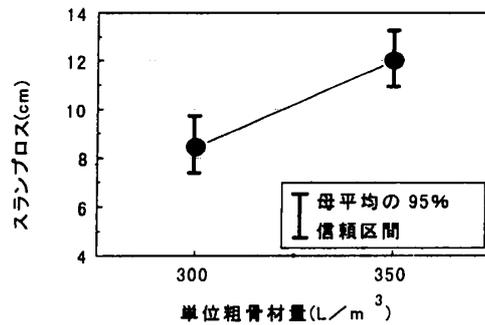


図-4 単位粗骨材量の要因効果図

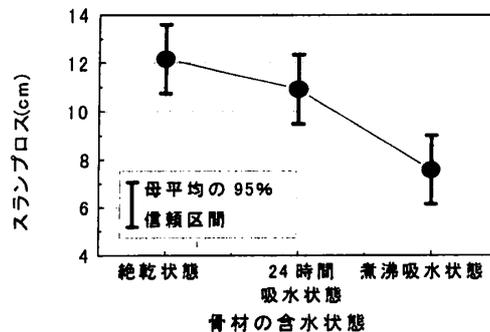


図-5 粗骨材の含水状態の要因効果図

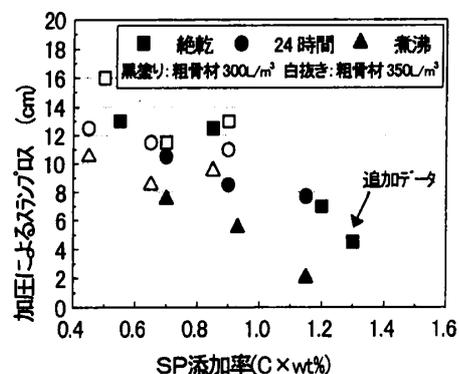


図-6 高性能AE減水剤添加量とスランプロス

圧による高性能AE減水剤の吸着等が影響⁵⁾を及ぼしているものと推察される。以上の結果より、コンクリートの加圧後のスランプロスに対して高性能AE減水剤量、単位粗骨材量および骨材の含水率が大きく影響することがわかったが、これらの結果と実際のポンプ圧送性を結び付けるためには、さらに管壁との摩擦やせん断応力の影響を調べる必要がある。

図-8に加圧前後の試験体のコンクリートの圧縮強度試験結果を、図-9に加圧前後の試験体のコンクリートの単位容積質量の測定結果をそれぞれ骨材の含水状態で分類して示した。これらの結果によれば、全体として加圧後の圧縮強度が大きくなっており、またコンクリートの単位容積質量も大きくなっている。加圧後にコンクリート強度が増加した原因としては、加圧吸水によりモルタルから骨材へ水分が移動してモルタルの強度が増加したことと、加圧により空気量が減少し単位容積質量が増加したことが考えられる。

4. まとめ

高性能軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリートのポンプ圧送試験ならびにポンプ圧送を想定した加圧実験の結果を以下にまとめる。

- (1) 絶乾状態の高性能軽量コンクリートを用いてもスランプロスを55cm程度に大きくすることでポンプ圧送が可能となる配合を見出すことができた。
- (2) 加圧によるスランプロスは、骨材への加圧吸水量の増減に影響する単位粗骨材量および骨材の含水状態の影響を大きく受ける。
- (3) スランプロスは、単位水量の影響よりも高性能AE減水剤量の影響を強く受ける。
- (4) スランプロスの原因は骨材への加圧吸水によるコンシステンシーの低下だけでは説明できない。高性能AE減水剤量の影響による圧力吸水特性の変化や加圧による高性能AE減水剤の吸着等の要因が影響を及ぼしているものと推察された。

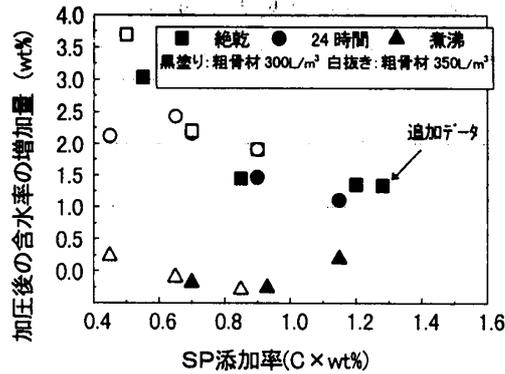


図-7 SP添加率と加圧後の含水率の増加量の関係

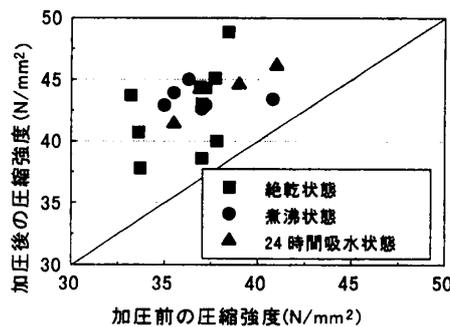


図-8 加圧前後の圧縮強度の関係

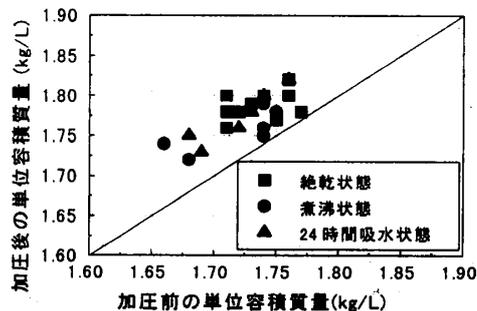


図-9 圧送前後の単位容積質量の関係

[参考文献]

- 1) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1
- 2) 和美広喜, 小森浩之, 田村直久, 笠井浩: 高強度軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究, コンクリート工学, Vol.10, No.2, pp.48-52, 1998.1
- 3) 田口玄一: 第3版実験計画法 上, 丸善 pp22-32, 1976
- 4) 高橋啓郎ほか: 統計数値解析, 培風館, pp117-122
- 5) 松尾茂美, 永峰秀則, 太田晃: 新規なポンプ圧送向上剤の作用機構, セメントコンクリート論文集, No.52, pp224-229, 1998