論文　単位容積質量 1.2t/m³ 以下の軽量高流動コンクリートに関する基礎性状

松原　功明[*1]・横関　康祐[*2]・平石　剛紀[*1]・坂田　昇[*3]

要旨：本研究では，全く新しい発想で開発された特殊増粘剤を用いて軽量コンクリートに適正な粘性を付与させることによって，さらなる軽量化を図るとともにポンプ圧送が可能な流動性を有するコンクリートの開発を目指して，実験的な検討を実施した。その結果，単位容積質量 1.2ｔ/m³ 以下でかつスランプフロー600mm 程度としても材料分離を生じない軽量高流動コンクリートが製造できることを明らかとした。また，そのコンクリートの圧縮強度は 15 N/mm² を超えるものもあり，室内試験レベルでポンプ圧送の可能性を確認した。

キーワード：軽量骨材コンクリート，高流動コンクリート，増粘剤，ポンプ圧送性

1.　はじめに

軽量コンクリートは，構造物重量を軽量化できるため,基礎構造を縮小することができる等,構造物のトータルコストを下げることが期待されている。著者らは土木構造物を対象として，凍結融解抵抗性などの耐久性を有し，かつ，ポンプ圧送が可能な高性能軽量コンクリートを開発している[1)]。この高性能軽量コンクリートは，単位容積質量 1.7～1.8ｔ/m³，圧縮強度 40～50N/mm² 程度である。

軽量コンクリートは，その長所を生かすため軽ければ軽い方が有利であるが，気泡モルタルなどを除けば，単位容積質量 1ｔ/m³ 程度でポンプ圧送が可能な軽量コンクリートは存在しないのが現状である。従来の技術では，さらなる軽量化を図る場合，ポンプ圧送に必要な流動性を付与し，かつ材料分離抵抗性を付与させるための適正な粘性をコンクリートに与えることが困難であった。そこで，本研究では，全く新しい発想で開発された特殊増粘剤を用いて軽量コンクリートに粘性を付与させることによって，単位容積質量 1.2ｔ/m³ 以下でかつポンプ圧送が可能な流動性を有する軽量高流動コンクリートの開発を目指して実験的な検討を行った。本論文では，特殊増粘剤を使用した軽量高流動コンクリートの性状を検討することを目的とした基礎試験と，特殊増粘剤によるポンプ圧送性改善効果を検討することを目的としたポンプ圧送性評価試験の結果について述べる。

2．実験概要

2.1 目標物性

本研究では，特殊増粘剤を用いることによって，単位容積質量 1.2t/m³ 以下，スランプフロー600±50mm の軽量高流動コンクリートを目指し，コンクリートの配合試験を実施した。さらに,この性能を有した上に，ポンプ圧送可能な軽量高流動コンクリートを開発することを目的とした。

2.2 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を**表－１**に示す。人工軽量骨材は，ポンプ圧送性を改善するためにプレウェッティングして使用するのが一般的である。しかし，軽量骨材における吸水率の管理が困難であること，コンクリートの凍結融解抵抗性を低下させる可能性がある[2)]ことから，細骨材，粗骨材共に絶乾状態で使用することとした。また，こ

*1 鹿島技術研究所　土木技術研究部　材料・ＬＣＥグループ　研究員　(正会員)
*2 鹿島技術研究所　土木技術研究部　材料・ＬＣＥグループ　主任研究員　(正会員)
*3 鹿島技術研究所　土木技術研究部　材料・ＬＣＥグループ　グループ長　(正会員)

こで用いた特殊増粘剤は，A成分およびB成分の二液性で，従来の分子量数十万以上の水溶性高分子とは異なり，分子量数百の低分子化合物を形成する。これが，分子会合を起こして高分子状の大きな高次構造体を形成し，従来にないレオロジー挙動を発揮する[3]。したがって，軽量骨材の分離を低減すると共に，ポンプ圧送性の改善効果が期待される。

表－1　使用材料

名称	種類	記号	摘要
セメント	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	C	密度：3.16g/cm3，比表面積：3270cm^2/g
細骨材	人工軽量細骨材	S	絶乾密度：0.71g/cm^3，表乾密度：0.77g/cm^3，FM 3.04
			24h吸水率：9.10%(1.2mm以下)，廃ガラス発泡再生骨材
粗骨材	人工軽量粗骨材	G	絶乾密度：0.93g/cm^3，24h吸水率12.8%，膨張頁岩系
			Gmax：15mm，FM：6.47
混和剤	特殊増粘剤	VIS	特殊増粘剤
			A成分：アニオン性特殊界面活性剤
			B成分：カチオン性特殊界面活性剤
	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表－2　コンクリート配合

W/C (%)	s/m (%)	単位量（上段：kg/m^3，下段：L/m^3）				
		W	C	S	G	Air
40	45	175	438	182	307	0
		175	139	256	330	100
		160	400	166	353	0
		160	126	234	380	100
		144	361	150	400	0
		144	114	212	430	100
55	50	181	329	202	307	0
		181	104	285	330	100
70	55	177	253	223	307	0
		177	80	313	330	100

実験に供したコンクリート配合を**表－2**に示す。本研究では，W/C を 40,55,70%の３水準としたコンクリートについて検討を行った。各水準とも，予備試験を実施し，モルタル中の細骨材の容積比（以下，s/m）を W/C 毎に設定した。また，W/C を 40%としたケースについては，単位粗骨材容積（以下，Gvol）を 330,380,430L の３水準とした。なお，空気量は 10%として配合計算を行った。

2.3 試験項目および試験方法

本試験における試験項目を**表－3**に示す。基礎試験では，特殊増粘剤の添加率を A 液，B 液共に単位水量に対して 1.25%と固定し，その他の各要因が軽量高流動コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に与える影響を検討した。練混ぜには 50L の強制二軸型ミキサを使用し，練混ぜ量を 40L とした。試験項目のうち，スランプフロー試験については，材料の特性を考慮し，スランプフローがほぼ最大となる，スランプコーン引き上げ後２分において測定することとした。また，コンクリートの間隙通過性を評価するボックス充填性試験では，土木学会が定める，高流動コンクリートに要求される３段階の充填性ランク[4]のうち，中間ランクであるランク２で評価することとした。空気量については，エアメータの測定限界である 20%を超える空気量が混入することも考えられたため，これに対応できる質量法を採用した。

ポンプ圧送性評価試験では，**表－2**に示した

表－3　試験項目

試験項目			摘要	備考
基礎試験	フレッシュ性状	スランプフロー	JIS A 1101	フロー開始後2分での測定値
		ボックス充填性試験	JSCE-F-511	R2(3本)
		空気量	JIS A 1116	質量法
		単位容積質量	JIS A 1116	－
	硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生材齢28日（φ100×200mm）
		乾燥収縮	JIS A 1129	100×100×400mm
		凍結融解	JSCE-G501	100×100×400mm
ポンプ圧送性を確認するための試験	回転翼型粘度計	トルク	－	－
		回転数	－	－
	非排水加圧試験（加圧前後）	スランプフロー	JIS A 1101	フロー開始後2分での測定値
		空気量	JIS A 1116	質量法

配合のうち，Gvol を 330L としたケースについて，各混和剤添加率を変化させ，その際のポンプ圧送性を相対的に評価した。練混ぜには 100L の強制二軸型ミキサを使用し，練混ぜ量を 60L とした。本試験では，既往の研究でポンプ圧送性の評価試験として適用実績のある非排水の加圧試験 [5]および回転翼型粘度計による試験 [6]を採用した（**表－３**）。ここでは，ポンプ圧送性の向上を目的として特殊増粘剤を高添加したが，加圧による流動性の変化を比較するには，初期スランプフローを一定に保つ必要があると考えられたため，スランプフローが 600±50mm を満足するように高性能ＡＥ減水剤（以下，SP）添加率を調節した。また，本コンクリートは，混入される空気量が一般的なコンクリートより多く，空気量がポンプ圧送性に及ぼす影響が大きいと考えられたため，これを調整するために，一部の配合に適量の消泡剤を使用した。**表－４**に各混和剤の添加率および初期スランプフローの測定値を示す。試験項目のうち，加圧試験では既往の研究 [5]を参考に，ポンプ圧送時にコンクリートに作用する圧力を模擬し，加圧圧力を 1.5N/mm^2, 所定圧力に達してからの加圧時間を 1 分間とした。加圧前後でフレッシュ性状を比較することで，ポンプ圧送性を相対的に評価した。また，回転翼型粘度計を用いた試験では，回転翼の回転速度とその時に発生するトルクを測定し，コンクリートのレオロジー特性（見掛けの降伏値および見掛けの塑性粘度）を比較した。

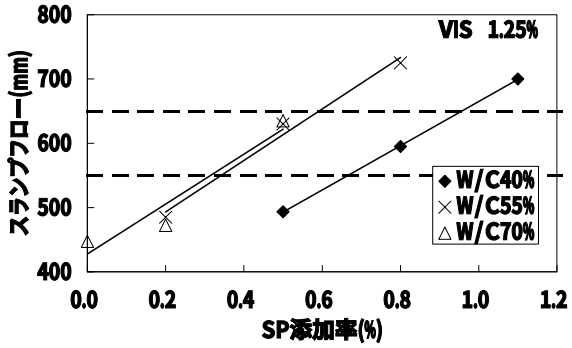
3．試験結果および考察

3．1　フレッシュ性状

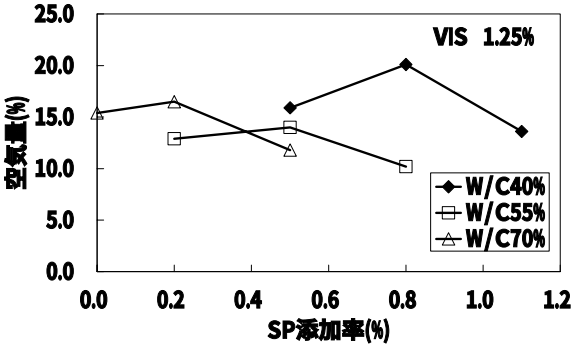
高性能 AE 減水剤（以下，SP）の添加率がスランプフローに及ぼす影響を**図－１**に示す。図に示すように，SP の添加率の増加に伴い，W/C によらずほぼ同じ勾配でスランプフローが大きくなる傾向を示した。なお，スランプフロー400～750mm 程度の範囲では，材料分離は確認されず，高い材料分離抵抗性を示した。

表－４　ポンプ圧送性試験における混和剤添加率

W/C	VIS A(W×%)	VIS B(W×%)	SP剤 (C×%)	消泡剤 (VIS×%)	初期フロー (mm)
40	1.25	1.25	0.8	0	650
	2.00	2.00	4.0	0	685
55	1.25	1.25	0.5	30	645
	1.75	1.75	1.0	30	668
	2.50	2.50	1.3	0	578
	2.50	2.50	4.0	0	608



図－１　SP 添加率とスランプフロー



図－２　SP の添加率と空気量の混入率

次に，SP の添加率と空気量の混入率の関係を**図－２**に示す。図より，空気量の混入率が最大となる SP 添加率が存在することが明らかとなった。これは，使用した特殊増粘剤の性質上，SP の添加率によってその起泡効果が低下することは考えられない [3]ため，通常のコンクリートと同様に，SP 添加率が多くなるとコンクリートの流動性が大きくなり空気の保持能力が低下したものと考えられる。

また，Gvol がボックス充填高さに及ぼす影響を**図－３**に示す。一般に，高流動コンクリートの Gvol は，Gmax を 20mm および 25mm とした場

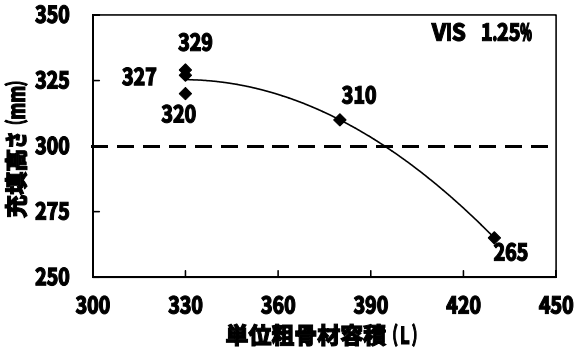
合 300～330L が適切であるとされている。これは，間隙通過性を考慮して決められ，その評価はボックス充填試験で 300mm 以上とされている[4)]。Gmax が 15mm の粗骨材を使用した本軽量高流動コンクリートでは，Gvol を 380L とした場合でもボックス充填高さ 300mm 以上を確保できた。

3.2　硬化性状

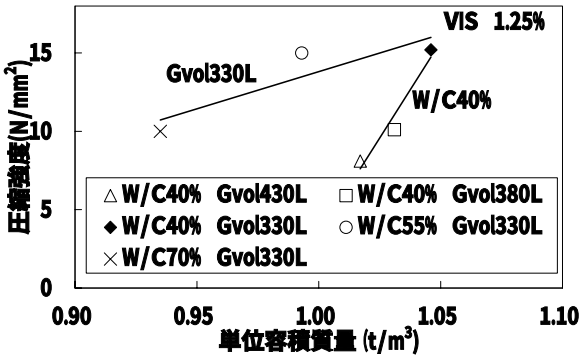
硬化後の単位容積質量と材齢 28 日での圧縮強度の関係を**図－４**に示す。図に示すように，単位容積質量は 0.94～1.05t/m^3，圧縮強度は 8.1～15.2N/mm^2 の範囲となった。なお，Gvol を 330L と一定とした場合では，すべての W/C において 10N/mm^2 以上となり，最大では 15N/mm^2 以上の圧縮強度が得られた。なお，W/C が減少するほど圧縮強度は増大し，水セメント比を一定とした場合では，Gvol が減少するほど圧縮強度が増大した。今回の検討の範囲では，圧縮強度に対する影響は W/C よりも Gvol の方が大きい結果となった。

乾燥収縮試験結果を**図－５**に示す。図に示すように，水セメント比別の乾燥収縮率には，大きな相違は確認されなかった。図中には，試験データのほか，普通コンクリートの乾燥収縮試験結果の一例[2)]を示した。本軽量高流動コンクリートの乾燥収縮は，乾燥材齢８週で普通コンクリートとほぼ同等となる結果であった。

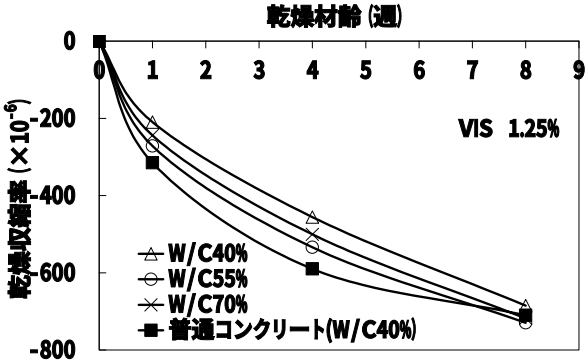
次に，凍結融解試験結果を**図－６**に示す。図中において，W/C を 70%としたケースでは，150 サイクルの時点で供試体の破損が著しくなったため，この時点で計測を中止した。その他の２ ケースについては，耐久性指数が 80%程度であり，十分な凍結融解抵抗性を有することが明らかになった。また，既往の標準的な軽量骨材コンクリートの試験結果の例[7)]を図中に示した。これと比較すると，特殊増粘剤を使用した軽量高流動コンクリートは，一般的な軽量高流動コンクリートに比べ，凍結融解性に優れていることが分かる。これは，一般的な軽量コンクリートが骨材をプレウェッティングして使用するため，骨材中に存在する水分が，より凍結融



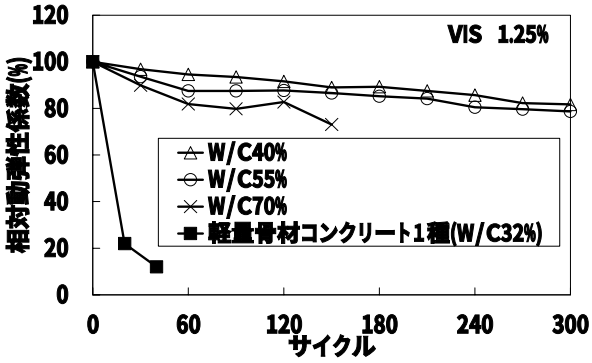
図－３　単位粗骨材容積と充填高さ



図－４　単位容積質量と圧縮強度



図－５　乾燥収縮試験結果



図－６　凍結融解試験結果

解抵抗性を低下させるのに対し,今回は細･粗骨材共に絶乾状態で使用したため，そのような現象が発生しにくかったためと考えられる。

3.3　ポンプ圧送性状

（1）非排水加圧試験

特殊増粘剤添加率がスランプフロー減少率に及ぼす影響を**図－7**に示す。ここで，スランプフロー減少率とは，加圧前後のスランプフローの減少量を，加圧前のスランプフローで除した値である。図より，特殊増粘剤添加率が増加するほど，スランプフロー減少率が小さくなる結果となった。

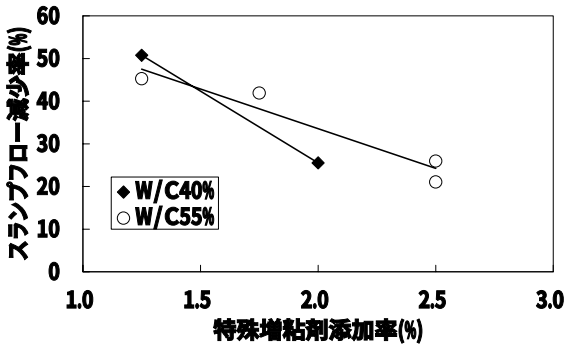
空気量減少率および初期空気量とスランプフロー減少率の関係を**図－8**に示す。なお，空気量減少率とは，加圧前後の空気量の減少量を，加圧前の空気量で除した値である。図より，空気減少率が小さいほどスランプフロー減少率が小さくなることがわかる。また，初期空気量が多いほどスランプフロー減少率は小さくなるが,これは，加圧，除荷によるコンクリートの体積収縮，膨張を大量に混入された空気泡が負担するため，骨材の吸水などが発生しにくいためと考えられる。増粘剤添加率と，空気量減少率および初期空気量との関係を**図－9**に示す。図より，特殊増粘剤の添加率が多いほど初期空気量は増加し，空気量減少率は低下する傾向を示した。

以上より，増粘剤添加率を増加させることにより起泡効果が増大して初期空気量が増加し，増粘効果が大きくなることによって空気量減少率が低下した結果，**図－7**に示すようにスランプフロー減少率が低下したものと考えられる。

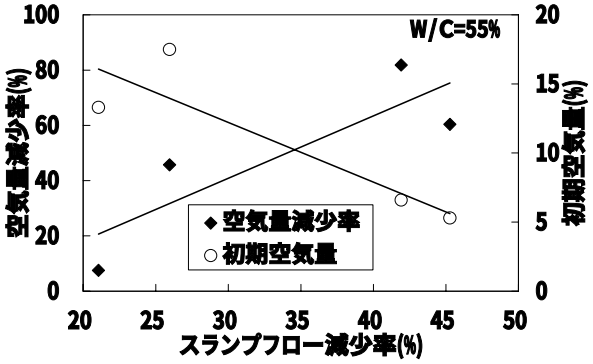
（2）回転翼型粘度計試験

試験結果を**図－10**に示す。試験は，代表的な配合を抜粋して実施した。図において，近似直線の延長とX軸との交点が見掛けの降伏値を示し，近似直線の傾きの逆数が見掛けの塑性粘度を示す。

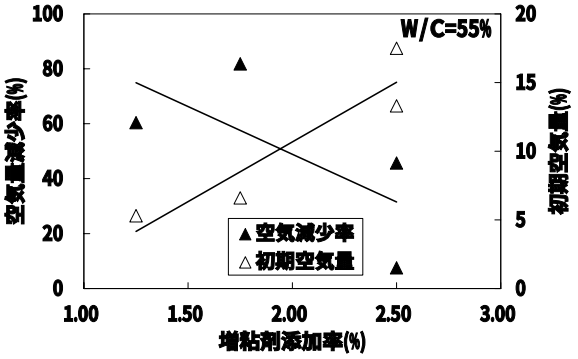
図より，同一水セメント比では特殊増粘剤添加率が多いほど塑性粘度は増加するが，降伏値



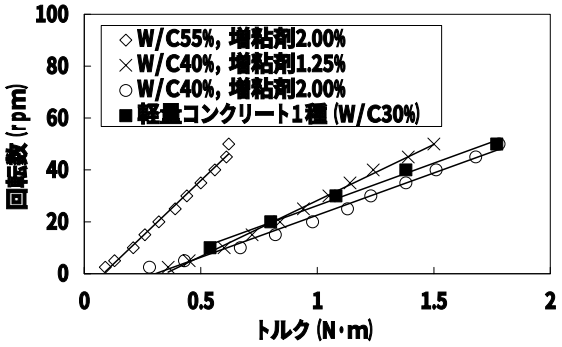
図－7　特殊増粘剤添加率とスランプフロー減少率



図－8　空気量とスランプフロー減少率



図－9　増粘剤添加率と空気量



図－10　トルクと回転数

はほとんど変化しないことが分かる。また，特殊増粘剤の添加率を一定とした場合，水セメント比が大きいほど見掛けの塑性粘度が低下し，降伏値も低下した。なお，図中には，土木学会に規定される軽量骨材コンクリート１種のうち，ポンプ圧送可能な配合（W/C30%，単位水量170kg/m^3，スランプフロー605mm，単位容積質量1.8t/m^3）についての試験結果例[8)]を示した。特殊増粘剤を使用した軽量コンクリートは，W/Cを 40%としたケースにおいて，W/C30%の軽量骨材コンクリート１種と見掛けの塑性粘度および降伏値が同程度の値となった。コンクリートのポンプ圧送性にはレオロジー特性のほか，骨材の加圧吸水なども大きく影響するとされているが，レオロジー特性のみを比較した結果では，本軽量高流動コンクリートのポンプ圧送が十分可能であると考えられた。

以上より，特殊増粘剤の作用により，空気量と粘性を改善させることで，ポンプ圧送性が改善される可能性があることが明らかになった。

4．まとめ

新たに開発された特殊増粘剤を使用することにより，従来にない軽量高流動コンクリートを開発することができ，その性状について以下のことが明らかになった。

（１）特殊増粘剤の使用により，高い材料分離抵抗性を有する，スランプフロー600±50mm の軽量高流動コンクリートの製造が可能になった。

（２）単位容積質量 0.94～1.05t/m^3 で 8.1～15.2N/mm^2 の圧縮強度を得ることができた。

（３）乾燥収縮，凍結融解抵抗性は普通コンクリートとほぼ同等である。

（４）特殊増粘剤を使用した軽量高流動コンクリートのポンプ圧送性は，空気量の増加と増粘作用により改善されることが明らかになった。

なお，今後は，実機を用いたポンプ圧送性評価試験を実施し，ポンプ圧送可能な軽量高流動コンクリートを開発していく予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり，材料の提供およびご指導をいただいた，花王株式会社の水沼達也氏，山室穂高氏，小柳幸司氏に深く感謝の意を表する。

参考文献

1) 柳井修司，坂田昇，信田佳延，石川雄康：高性能軽量コンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，VoL.22，No.2，2000
2) 高性能軽量コンクリート研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，2000.8
3) 山室穂高，小柳幸司，横関康祐，松原功明：新規特殊増粘剤を用いたペーストおよび軽量高流動モルタルの基礎物性，コンクリート工学年次論文報告集，VoL.24，投稿中，2003
4) 高流動コンクリート施工指針，土木学会，1999.7
5) 石川雄康，児玉昭彦，坂田昇，柳井修司：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，コンクリート工学年次論文報告集，VoL.21，No.2，1999
6) 和美廣喜，笠井浩，柳田克巳，亀田泰弘：回転翼粘度計による高強度コンクリートの流動特性値測定方法に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，第１巻１号，1990
7) 橘大介，木村薫，内藤憲一：高品質人工軽量骨材が軽量コンクリートの物性改善に及ぼす効果，土木学会論文集，No.496，pp.89-98，1994
8) 笠井浩，和美廣喜，稲垣和彦，藤木英一，斉藤昭雄，富岡一則：石灰石を用いたコンクリート用骨材の開発，日本建築学会学術講演梗概集，A-1，pp693-694，2002