

論文 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

平石 剛紀^{*1}・横関 康祐^{*2}・坂田 昇^{*3}・上杉 祥文^{*4}

要旨：盛土代替材料として、凍結融解抵抗性に優れ、かつ 1.8t/m^3 以下のコンクリートのポンプ施工が求められた実工事を対象とし、コンクリートの配合検討を行った。コンクリートは、軽量骨材を気乾状態で使用した軽量コンクリート（I種）とした。ポンプ圧送試験を実施した結果、特殊増粘剤を添加するとともに空気量を増加させ、コンクリートに適度な粘性と材料分離抵抗性を付与することで、水平換算距離 167m をポンプ圧送することができ、所定の品質を満足するコンクリートが得られることを確認した。

キーワード：軽量コンクリート、ポンプ圧送性、増粘剤、人工軽量骨材、軽量盛土

1. はじめに

軽量コンクリートは、下部構造への負担の軽減が求められるコンクリート構造物にとって有効な材料であり、コスト削減、工期短縮などのメリットが期待できる。しかしながら、従来の軽量コンクリートは、ポンプ圧送により施工する場合、使用する軽量骨材の吸水率が大きいため、十分なプレウェッティングが必要であり、骨材の品質管理が煩雑になるばかりでなく、凍結融解抵抗性に劣るものであった。一方、これらの課題を解決すべく、吸水率の低い高性能軽量骨材を気乾状態で使用した軽量コンクリートが開発されている¹⁾。しかし、高性能軽量骨材の供給体制が十分に整備されていないのが現状であり、広く適用されるまでには至っていない。

これらを背景として、著者らは、一般的な人工軽量骨材を気乾状態で使用した軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する検討を行ってきた²⁾。これまでの検討の結果、新たに開発した特殊増粘剤を使用することで、軽量コンクリートのポンプ圧送性が改善される可能性を見出した。

本研究では、盛土代替材料として軽量コンクリートの施工が求められた実工事を対象として、

この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ついて検討を行った。本論文では、一連の配合検討試験のうち、モデル試験および実工事を模擬した施工試験で実施したポンプ圧送試験の結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 要求性能および目標性能

盛土代替材料として軽量コンクリートに求められた主な要求性能は、①単位容積質量 1.8t/m^3 以下、②水平換算距離 100m 以上のポンプ圧送が可能であること、③施工時に簡易な締固めで充填できること、④耐凍結融解抵抗性を有すること、⑤盛土材料 (1.7N/mm^2) と同等以上の強度を有することの5項目である。

そこで、本研究では、目標性能を①単位容積質量 1.7t/m^3 以下、②水平換算距離 150m 以上のポンプ圧送が可能であること、③圧送後のスランプフロー $400\pm 100\text{mm}$ 、④凍結融解試験（300 サイクル後）における相対動弾性係数 60%以上、⑤配合強度 2.1N/mm^2 以上、かつ脱型作業を考慮し、材齢 1 日における圧縮強度が 1.0N/mm^2 以上と設定し検討を行った。

*1 鹿島技術研究所 材料・LCEグループ 研究員（正会員）

*2 鹿島技術研究所 材料・LCEグループ 主任研究員（正会員）

*3 鹿島技術研究所 材料・LCEグループ チーフ兼上席研究員 工博（正会員）

*4 鹿島建設(株) 関東支店茨城営業所

2.2 使用材料

本研究で対象とした軽量コンクリートの使用材料を表-1に示す。ここでは、要求性能とコストの観点から、気乾状態の軽量骨材を使用した軽量コンクリート（I種）を採用することとした。また、モデル試験において比較検討した、JIS規格を満足する軽量コンクリートの使用材料を表-2に示す。表-1で

使用した人工軽量骨材は気乾状態のものを、表-2で使用した人工軽量骨材は十分にプレウェッティングしたものをそれぞれ用いた。なお、表-1で使用した特殊増粘剤は、 α 剤と β 剤の2液性である。従来の増粘剤は分子量が数十万以上の水溶性高分子であるのに対し、この特殊増粘剤は分子量数百の低分子化合物が、分子会合を起こし高分子状の大きな高次構造体を形成することで従来にないレオロジー挙動を発揮するものである³⁾。

2.3 検討ケースおよびコンクリート配合

試験に供したコンクリート配合を表-3に示す。モデル試験では、配合A、B、Cの3配合を用いて検討を行った。配合A、Bは事前の試験練りで選定したものであり、配合CはJIS規格を満足する軽量コンクリート（I種）のうち最も軽量のものとした。なお、配合Cは、圧送性を比較検討するために使用したものであり、単位容積質量が 1.93t/m^3 （気乾状態で 1.85t/m^3 ）と、今回の目標性能を満足するものではない。また、配合A、Bは、練上り直後の目標スランプフローを、それぞれ500mm、600mmとし、比較用の配合Cは、練上り直後の目標スランプを21cm（スランプフロー400mm程度）とした。

実機試験では、モデル試験の結果をもとに、

表-1 使用材料（配合A、B、A'）

使用材料	記号	種類	物性または主成分
セメント	C ₁	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3,310\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S ₁	利根川水系陸砂	表乾密度 2.58g/cm^3 、吸水率2.07%、粗粒率2.79
人工軽量粗骨材	G ₁	膨張頁岩系	表乾密度 1.05g/cm^3 、絶乾密度 0.968g/cm^3 Gmax15mm、24時間吸水率8.53%、実積率66.0%
混和剤	VIS	特殊増粘剤	α 剤：アニオン性特殊界面活性剤 β 剤：カチオン系特殊界面活性剤
	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表-2 使用材料（配合C）

使用材料	記号	種類	物性または主成分	
セメント	C ₂	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm^3	
細骨材	S ₂	S1	砕砂	表乾密度 2.62g/cm^3 、吸水率2.04%、粗粒率3.00
		S2	陸砂	表乾密度 2.56g/cm^3 、吸水率2.53%、粗粒率1.80
		S3	陸砂	表乾密度 2.60g/cm^3 、吸水率2.61%、粗粒率3.00
		S1:S2:S3=50:25:25		
人工軽量粗骨材	G ₂	膨張頁岩系	表乾密度 1.65g/cm^3 、絶乾密度 1.29g/cm^3 Gmax15mm、吸水率28.0%、実積率64.0%	
混和剤	AD	AE減水剤	リグニンスルホン酸系	

表-3 コンクリート配合

No.	W/C	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)				SP AD (C×%)	VIS (W×%)		
				W	C	S	G*		α	β	
室内試験	A	50	10.0	1663	189	379	838	257	2.0	1.5	1.5
	B		10.0	1634	213	426	738	257	2.0	2.0	2.0
	C		5.0	1931	200	400	829	502	0.375	-	-
実機試験	A'		10.0	1663	189	379	838	257	2.0	1.75	1.75

※：配合A、B、A'では絶乾重量を表示、配合Cでは表乾重量を表示

実機を用いた試験練りにより配合修正を行った配合A'を使用した。

なお、事前検討の結果から、ポンプ圧送性および材料分離抵抗性の改善を目的として、配合A、B、A'では空気量を10%以上に設定し、練混ぜ時にAE剤を用いて調整した。

2.4 練混ぜ

モデル試験では、各配合とも 1.0m^3 のコンクリートを実験に供した。配合A、Bは、100Lの強制二軸型ミキサーを使用して、練混ぜ量を100Lとして練り混ぜた。練混ぜ手順は、粗骨材および特殊増粘剤 β 剤を除く材料を投入し30秒間練り混ぜ、その後 β 剤を投入し30秒、さらに粗骨材を投入し30秒間練り混ぜて排出した。配合Cは市中のバッチャープラントにて製造した。

実機試験では、市中のレディーミクストコンクリート工場の強制二軸型ミキサーを用いて、練混ぜ量を 2.5m^3 として計 20m^3 のコンクリート

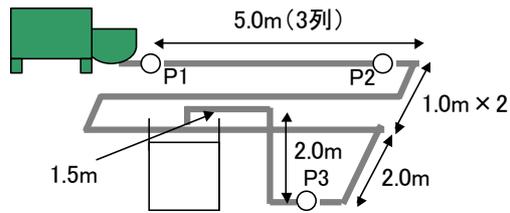


図-1 モデル試験配管形状 (水平換算距離 84m)

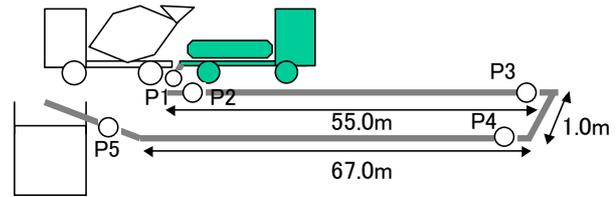


図-3 実機試験配管形状 (水平換算距離 167m)

○印；管内圧力計測箇所

を製造した。ここでは、特殊増粘剤β剤を除く材料を投入し30秒間練り混ぜ、その後β剤を投入し90秒間練り混ぜて排出した。

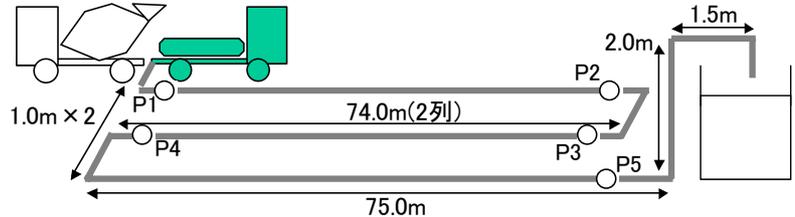


図-2 実機試験配管形状 (水平換算距離 285m)

なお、配合A, B, A'に使用した軽量骨材の含水率は、モデル試験で0.2%、実機試験で4.4%であった。このため、実機試験では水量を補正して練混ぜを行った。ただし、練混ぜ中および圧送による骨材への吸水に対しては、配合修正を行わないこととした。

2.5 試験項目および試験方法

試験項目を表-4に示す。試験では、ポンプ圧送前後でのフレッシュ性状および硬化物性の変化を確認するとともに、配管途中での圧力計測等によりポンプ圧送性の評価を行った。

モデル試験の配管形状を図-1に示す。配管径は4B管(10cm)とし、配管長は水平換算距離で84mとした。コンクリートポンプには、最大設計吐出量26m³/h、最大吐出圧力4.1N/mm²の複列油圧ピストンの定置式ポンプを使用し、設定吐出量を10m³/hとして試験を行った。

実機試験における配管形状を図-2, 3に示す。配管径は5B管(12.5cm)とし、配管長は、水平換算距離285m(図-2)および167m(図-3)の2ケースとした。コンクリートポンプには、最大設計吐出量115m³/h、最大吐出圧力4.7N/mm²の複列油圧ピストンのポンプ車を使用し、設定吐出量を30m³/hとして試験を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 モデル試験

各配合の圧送前におけるフレッシュ試験結果

表-4 試験項目

項目	試験方法	モデル試験		実機試験	
		圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
スランプフロー	JIS A 1150	○	○	○	○
空気量	JIS A 1116 (質量法)	○	○	○	○
単位容積質量		○	○	○	○
コンクリート温度	温度計	○	○	○	○
粗骨材の含水率	-	配合B,Cのみ実施		○	○
圧縮強度	JIS A 1108	○	○	○	○
凍結融解抵抗性	JSCE-G501	○	○	-	-
主油圧	主油圧計	-		○	
管内圧力	管内圧力計	○		○	

表-5 フレッシュ試験結果 (圧送前)

配合No.	コンクリート温度(°C)	スランプ(cm)	スランプフロー(mm)	空気量		単位容積質量(kg/m³)
				平均	(%)	
A	19.1	-	470×440	455	16.2	1549
B	19.6	-	605×595	598	9.9	1636
C	25.4	22.5	430×400	415	5.3	1918

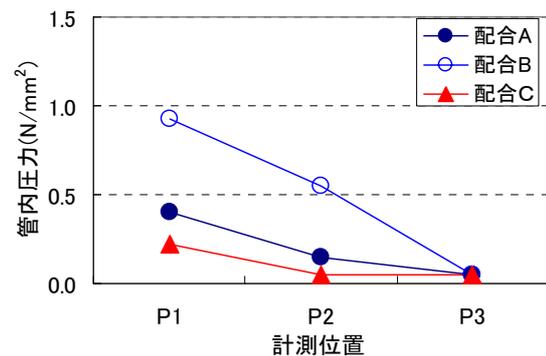


図-4 管内圧力計測結果

を表-5に示す。配合Cに比べ配合A, Bでは、特殊増粘剤を使用したため粘性が高くなっており、スランプフローが停止するまでに時間を要した。そこで、5分経過時点での値を試験値とした。なお、配合Bにおけるスランプフロー

500mm 到達時間は2分30秒であった。

図-4に圧送が安定した状態における管内圧力の計測結果を示す。配合A, Bの管内圧力は、配合Cに比べ高い値を示した。また、配合A, Bを比較すると、流動性の大きい配合Bの管内圧力の方が高い値を示した。これは、特殊増粘剤の添加率が増加したことにより、コンクリートの粘性が高まり、圧送抵抗が増加したことによるものと考えられた。

圧送によるスランプフローの変化を図-5に、単位容積質量の変化を図-6に示す。配合Aでは、圧送によりスランプフローが低下する傾向を示したが、配合Bのスランプフローは、プレウエッティングした軽量骨材を用いた配合C同様、圧送前後でほぼ一定であった。また、図-6より、全ての配合で圧送により単位容積質量が若干増加した。特に、流動性の低下が大きい配合Aでは、その傾向が顕著であった。この理由としては、明確ではないが、加圧による空気量の減少による影響と骨材への吸水による影響が考えられた。

圧送前後におけるコンクリート中の骨材の含水率を図-7に示す。配合Cでは、プレウエッティングした骨材を使用したことから、圧送前後における含水率に差はなく、25%程度と高い値で安定していた。一方、配合Bでは、圧送前が3.0%であったのに対し、圧送後は8.8%であり、圧送圧力により含水率が5.8%増加した。これは、水量にして約15kg/m³に相当する。しかし、配合Bでは、圧送前後における流動性の低下が認められないことから、特殊増粘剤の添加により粘性が付与されたことで、水量の変動による流動性への影響が鈍化したものと推察された。また、配合Aにおける圧送後の骨材含水率の測定は実施していないが、配合Aでは圧送によるスランプフローの低下が大きいことから、圧送後の骨材含水率は、配合Bと同等以上であったと推察された。

図-8に凍結融解抵抗性試験結果を示す。配合Cでは、試験開始後30サイクルで供試体にひ

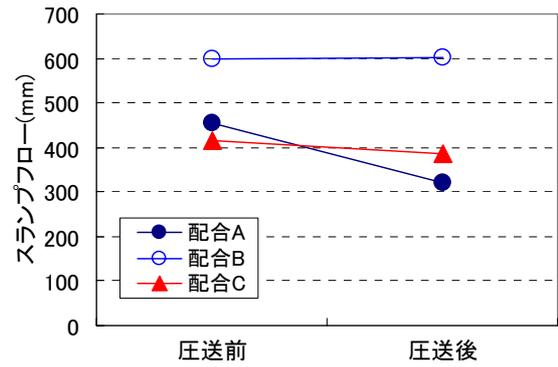


図-5 圧送前後のスランプフロー

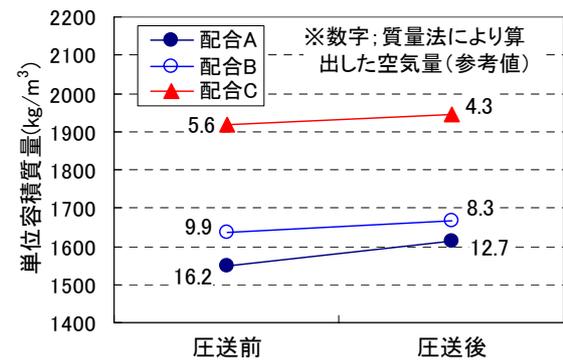


図-6 圧送前後の単位容積質量

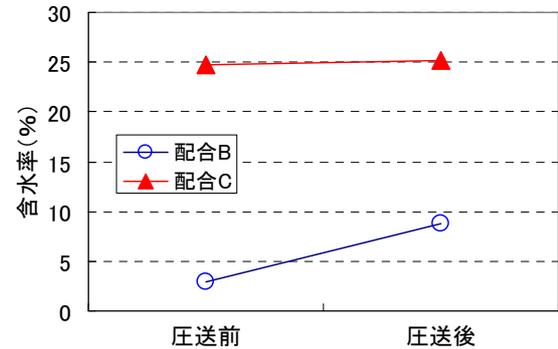


図-7 圧送前後の骨材含水率

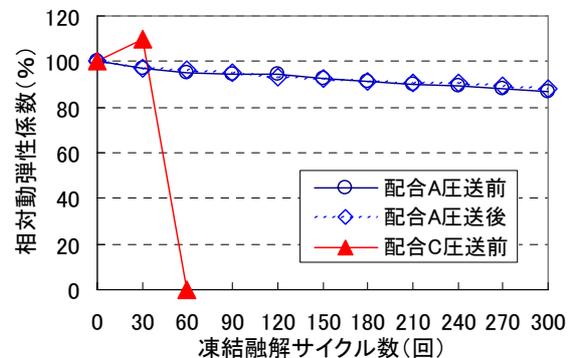


図-8 凍結融解試験結果

び割れが入り、60サイクルにおいて供試体が破壊した。一方、配合Aでは、300サイクル経過後も、80%以上の相対動弾性係数を示した。これ

は、骨材を気乾状態で使用したことおよびAE剤を用いて良質なエントレインドエアーを十分に混合したことによる効果と考えられた。

また、材齢1日における圧縮強度は、配合A、Bともに圧送前後に関わらず、 5 N/mm^2 程度の値を示し目標性能を満足するものであった。なお、配合Cでは 6 N/mm^2 程度であった。

以上、モデル試験では、軽量骨材を気乾状態で用いた配合A、Bともに、材料分離や配管の閉塞もなく、円滑にポンプ圧送を行うことができた。

水平換算距離150mのポンプ圧送を目標とした本研究では、圧送前後における流動性の低下の少ない配合Bが望ましいが、配合Aにおいても、目標性能を満足することができると判断した。また、コスト低減の観点から、ここでは特殊増粘剤の少ない配合Aを選定配合とし、以降の実機試験を実施することとした。

3.2 実機試験

ポンプ圧送試験に先立ち、実機により配合Aの試験練りを行ったところ、モデル試験に比べ粘性が低下する傾向を示した。そこで、特殊増粘剤の添加率を0.25%増加させた配合A'に修正し、ポンプ圧送試験を実施した。

図-9にフレッシュ性状の経時変化の一例を示す。時間の経過に伴いスランプフローが大きくなる傾向を示した。これは、試験時期が夏場であったため、モデル試験とは異なり遅延型のSPを使用したことに加え、アジテートの影響で時間の経過に伴い空気量が増大したことによるものと考えられた。ここでは、運搬時間に30分を要する実工事を想定し、30分間待機させたコンクリートを用いて、水平換算距離285m、167mの順に試験を行った。なお、本試験では、バッチ間の変動はほとんど認められず、安定した性状のコンクリートを供給することができた。

図-10にピストン前面圧および管内圧力を、図-11にピストン前面圧の経時変化を示す。水平換算距離285mの圧送試験では、時間の経過とともに、ピストン前面圧および管内圧力が徐々

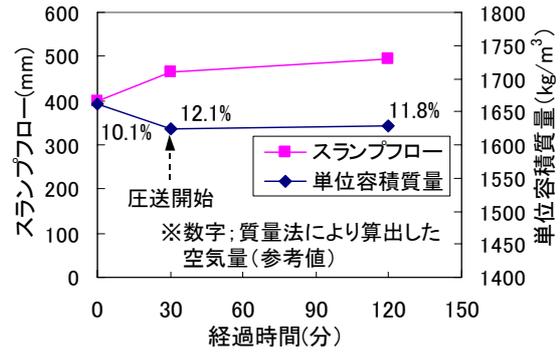


図-9 フレッシュ性状の経時変化

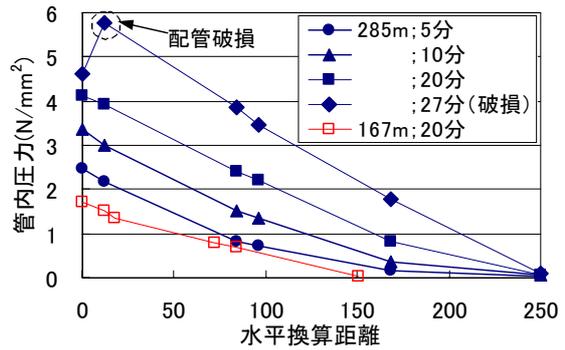


図-10 ピストン前面圧および管内圧力

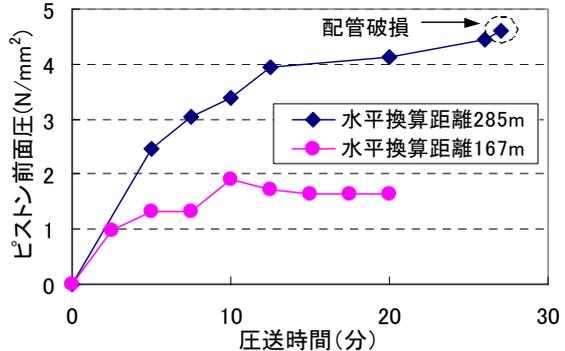


図-11 ピストン前面圧の経時変化

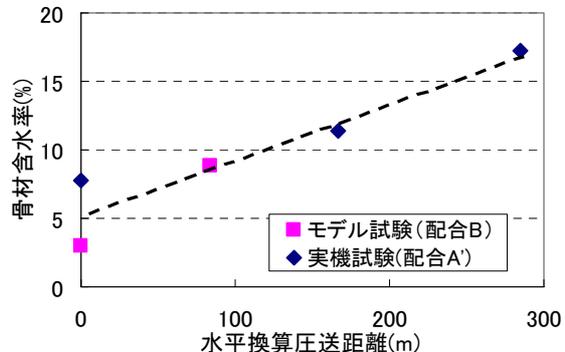


図-12 圧送距離と骨材含水率の関係

に高くなり、約 5 m^3 のコンクリートを圧送した時点でポンプ車付近のテーパ管の位置でジョイント部分が破損した。そこで、配管長を167mに

替え、ポンプ圧送を再開した。その結果、ピストン前面圧および管内圧力は、圧送開始後 10 分経過時点より安定し、約 10m³ のコンクリートを円滑にポンプ圧送により打設することができた。

図-12 に圧送距離と圧送後のコンクリート中の骨材含水率の関係を示す。圧送距離が長くなると、骨材含水率も大きくなる傾向にあり、水平換算距離 167m の圧送では 11.4%、285m の圧送では 17.3%であった。これは、練上り直後に比べ、水平換算距離 167m の圧送で 3.6%、285m の圧送で 9.5%上昇したことになる。これより、水平換算距離 285m の配管で閉塞した原因としては、主に骨材の吸水による流動性の低下が考えられた。一方で、骨材の含水率の増加が 3.6%程度以下であれば、配管を閉塞することなく、水平換算距離 167m 程度の圧送を行えることが明らかとなった。

図-13 に水平換算距離 167m のポンプ圧送前後のフレッシュ試験結果を示す。室内試験結果同様、圧送することによりスランプフローが小さく、単位容積質量が大きくなる傾向を示した。しかしながら、筒先より採取した試料のスランプフローは目標性能 (400±100mm) を満足するものであり、材料分離も認められず、簡易な締固めでコンクリートを充填できる状態であった。また、圧送前後における圧縮強度は、材齢 2 日で 8N/mm² 程度、材齢 28 日で 20N/mm² であり、圧送前後でほぼ同じ値を示した。

以上より、配合 A' を用いることで、ポンプ圧送により流動性は低下するものの、圧送距離が 150m 程度であれば、目標とする性能を満足するコンクリートが施工できることを確認した。

4. まとめ

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ついて、ポンプ圧送試験により検討を行った。本研究の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 気乾状態の軽量骨材を使用した場合でも、特殊増粘剤を添加し、空気量を 10%程度に設

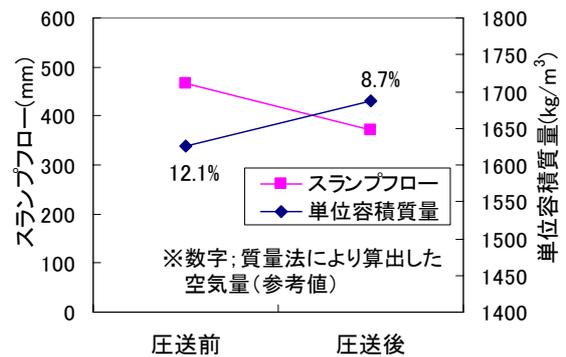


図-13 圧送前後のフレッシュ性状の変化

定して、流動性および材料分離抵抗性を付与することにより、水平換算距離 167m 程度のポンプ圧送が可能である。

- (2) (1) のコンクリートは、ポンプ圧送により、流動性が低下し、単位容積質量が増加するが、圧縮強度はほとんど変化しない。
- (3) (1) のコンクリートは、気乾状態の軽量骨材を使用し、空気量を 10%程度混入したことから、ポンプ圧送後においても十分な凍結融解抵抗性を有することを確認した。

謝辞：本研究を実施するに当たり、材料の提供および実験へのご協力を頂いた、花王株式会社、巴工業株式会社、有限会社五月女生コンの関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平石剛紀ほか：独立空隙型軽量骨材を用いたコンクリートのポンプ圧送性，日本コンクリート工学協会軽量コンクリートの性能の多様化と利用拡大に関するシンポジウム論文集 pp. 71-78, 2000. 8
- 2) 松原功明ほか：単位容積質量 1.2t/m³ 以下の軽量コンクリートに関する基礎性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 25, No. 1, pp. 1319-1324, 2003. 7
- 3) 山室穂高ほか：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性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 25, No. 1, pp. 1313-1318, 2003. 7