

論文 ポンプ圧送性に及ぼすセメントおよび混和材の種類の影響

伊藤智章^{*1}・松永 篤^{*2}

要旨: 高強度・高流動モルタルのポンプ圧送中の品質変化と、静的加圧試験および再練混ぜ試験による品質変化との関連性から、静的加圧試験がポンプ圧送性の簡易的判断方法として適用できる可能性があることを明らかにした。また、本試験により高強度コンクリートのポンプ圧送性に及ぼすセメントおよび混和材の種類の影響について検討した。その結果、セメントとしては高ビーライト系セメントが圧送性に優れ、混和材としては高ビーライト系セメントの場合にはシリカフュームおよび石灰石微粉末が、また、普通セメントの場合にはそれらに加えてフライアッシュや高炉スラグ微粉末も効果があることがわかった。

キーワード: 高強度コンクリート、ポンプ圧送、静的加圧、再練混ぜ、セメント、混和材

1. はじめに

高層建築物や LNG タンク等のコンクリート構造物において、施工の合理化、耐久性の向上の観点から、設計基準強度 60N/mm^2 を超える高強度・高流動コンクリートが施工されるようになっている。このような高強度・高流動コンクリートをポンプ施工する場合には、通常のコンクリートに比べて管内圧力損失が大きくなることやポンプ圧送後に流動性が低下することが知られており¹⁾、圧送性に優れた材料の開発が望まれている。また、ポンプ圧送性をモルタルあるいはコンクリートに静的な圧力を負荷させることにより検討する試みがなされているが^{2) 3)}、実機との対応関係については未だ十分に明らかにはされていない。

本研究は、低水セメント比の高流動モルタルを用いて、実際のポンプ圧送過程での品質変化と室内試験による静的加圧および再練混ぜによる品質変化との関連性を検討した。そして、静的加圧試験がポンプ圧送性の簡易的判断方法として適用できる可能性があることを明らかにするとともに、静的加圧試験によりポンプ圧送性に及ぼすセメントおよび混和材の種類の影響について検討した。

表-1 セメントの性質

種類 (記号)	密度 (g/cm ³)	アーレン比 表面積 (cm ² /g)	鉱物組成 (%)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
普通(NC)	3.15	3250	54	19	10	8
耐硫酸塩 (SRC)	3.20	3280	63	17	0.4	14
中庸(MC)	3.20	3200	44	35	3	12
低熱(LC)	3.21	3200	25	56	3	9
低熱(SLC)	3.24	3450	17	64	3	9
低熱(HLC)	3.20	4000	27	54	3	9

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは、表-1 に示す 6 種類のポルトランドセメントを使用した。

(2) 骨材

細骨材は福岡県産海砂(比重:2.57, 吸水率:1.80%, 粗粒率:2.72)を、粗骨材は山口県産硬質砂岩碎石(最大寸法:20mm, 比重:2.71, 吸水率:0.54%, 粗粒率:6.61)を使用した。

(3) 混和材

混和材は、表-2 に示すシリカフューム、石灰石微粉末、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用した。

* 1 宇部興産(株)建設資材事業本部技術開発部セメントグループ (正会員)

* 2 宇部興産(株)建設資材事業本部技術開発部セメントグループ主席研究員 工修 (正会員)

(4) 混和剤

混和剤は、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤と消泡剤を併用した。

2.2 試験方法

(1) モルタルのポンプ圧送および静的加圧による品質変化

モルタルの配合条件を表-3に示す。0打フローの調整は高性能 AE 減水剤の添加量により行った。なお、この条件は表4に示すコンクリートから粗骨材を除いた場合にほぼ相当する。

モルタルのポンプ圧送は、スクイズ式モルタルポンプ（公称最大吐出圧力: 2 N/mm², 管内径: 50mm, 配管材質: 硬質ゴム）を使用し、図-1に示す条件で行った。圧送は、運搬時間が長く、流動性の低下を生じ易い条件を想定して練混ぜ後 70~80 分静置後に実行した。ホッパ、ポンプ出口、筒先の各個所から採取したモルタルについて、JIS A 5201 のフローコーンを用いた0打フロー、V₃₀漏斗流下時間および空気量を測定した。また、ポンプ出口部に取付けた圧力計から圧送圧力を、筒先において吐出量の測定を行った。なお、ポンプ出口部の試料の採取は、ポンプの運転を一時停止し、配管を取り外して行った。また、同様に 70~80 分間静置保存したモルタルについて鋼製加圧容器（Φ125mm, 容量 2.5ℓ）および耐圧機を用いて 5 N/mm², 5 分間の加圧を行った後、容器から試料を取り出し、練直しを行ってから同様の品質試験を行った。

モルタルの圧縮強度試験は、供試体寸法をΦ5×10cm とし、標準水中養生による材齢 7, 28 および 91 日に JIS A 1108 に準じて行った。

(2) コンクリートの静的加圧および再練混ぜによる品質変化試験

コンクリートの配合条件を表-4に示す。練混ぜ後 70~80 分間静置保存したコンクリートを鋼製加圧容器（Φ275mm, 容量 25ℓ）および耐圧機を用いて 5 N/mm², 5 分間の加圧を行った後、容器から試料を取り出し、練直しを行ってからスランプフロー、○漏斗流下時間およ

表-2 混和材の性質

種類(記号)	密度(g/cm ³)	アーレン比 表面積(cm ² /g)	その他
シリカフューム(SF)	2.20	200000*	*BET比表面積
石灰石微粉末(LP5)	2.71	4820	-
" (LP20)	2.71	19450	-
フライアッシュ(FA1)	2.27	4290	ig loss: 3.8%
" (FA2)	2.17	2680	ig loss: 3.9%
高炉スラグ(BS4)	2.90	4050	-
" (BS6)	2.90	5920	-

表-3 モルタルの配合条件

水結合材比(%)	砂結合材比	混和材置換率(%)	70~80分静置後	
			0打フロー(mm)	空気量(%)
30	1.5	0, 10, 50 ¹⁾	280±20	2.0±0.5

1)置換率 50%は BS4 の場合のみ

表-4 コンクリートの配合条件

水結合材比(%)	単位水量(kg/m ³)	細骨材率(%)	SF置換率(%)	70~80分静置後	
				スランプフロー(cm)	空気量(%)
30	185	50	0, 5, 10	60±2.5	2.5±0.5

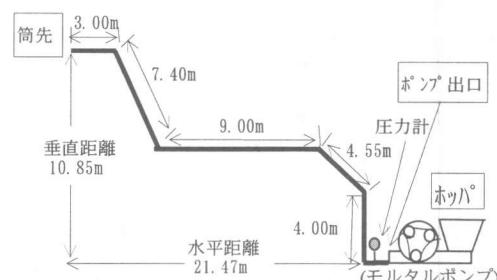


図-1 圧送条件

び空気量の測定を行った。また、加圧後のコンクリートを練混ぜに用いたものと同様のパン型強制練りミキサを用いて 5 分間の再練混ぜを行い、同様の品質試験を行った。なお、再練混ぜ中の空気量の増加を防止するため消泡剤を追加使用した。

(3) 混和剤の吸着量

ポンプ圧送時のホッパ、ポンプ出口部、筒先

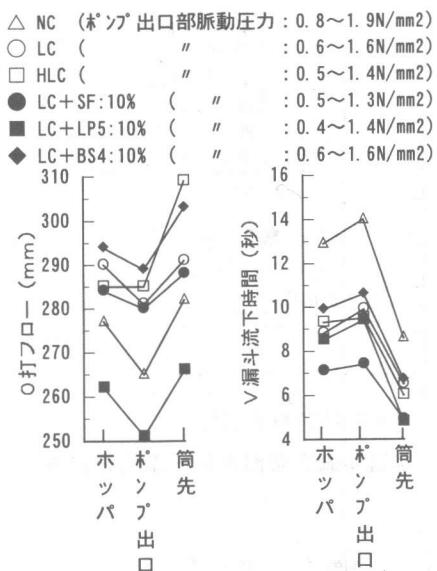


図-2 ポンプ圧送中のモルタルの品質変化

から採取したモルタルおよび静的加圧前後のモルタルを用いて、遠心分離および吸引濾過により抽出した液相中の残存した混和剤量を全有機炭素計を用いて測定した。求めた液相中の混和剤量と練混ぜ時に混入した混和剤との差を粉体量で除して混和剤吸着量を算出した。

(4) モルタルの気泡分布

ポンプ圧送時のホッパ、ポンプ出口部、筒先から採取したモルタルにより作製した $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体について、供試体の高さ方向 5cm の位置の切断面の気泡分布を画像解析処理装置により測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルのポンプ圧送による品質変化

ポンプ圧送中のモルタルの 0打フロー および V 漏斗流下時間の変化を図-2に示す。いずれのモルタルもポンプ出口部では、 0打フロー が低下し、また、 V 漏斗流下時間が長くなった。その後筒先では逆に流動性が回復し、 0打フロー は圧送前のホッパ部と同等かやや大きくなり、 V 漏斗流下時間は圧送前より短く、粘性の低下が認められた。このような流動性の変化は、NCおよび混和材にLPを使用した場合には他の

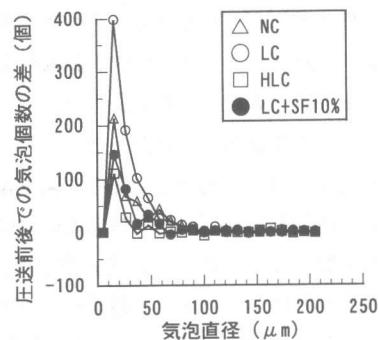


図-3 圧送前後での気泡分布の変化

表-5 ポンプ圧送中および静的加圧前後のモルタルの混和剤吸着量 (mg/g)

配合記号	ポンプ圧送			静的加圧	
	ホッパ	ポンプ出口	筒先	静置	加圧後
LC	15.1	15.1	15.2	16.0	16.3
LC+SF10%	24.4	24.5	24.5	24.0	25.5

LC、HLC や混和材として BS、SF を使用した場合に比べて大きくなつた。

ポンプ出口部において流動性が低下する原因を検討するために混和剤吸着量を測定した結果を表-5に示すが、圧送中の混和剤吸着量の変化は認められない。圧送中のモルタルにはポンプによる圧力と移動によるせん断変形が作用し、ポンプ内では主に圧力の影響を受けていると考えられることから、セメントおよび骨材の微細空隙への吸水や粒子の間隔が小さくなること等がポンプ出口部での流動性の低下に影響しているのではないかと考えられる。なお、表-5に示す圧力 5N/mm^2 を5分間作用させた静的加圧試験後の場合には混和剤の吸着量がわずかに大きくなっていることから、圧送圧力が高い場合には混和剤の吸着が流動性に影響を及ぼす可能性があると考えられる。また、ポンプ圧送前後のモルタルの気泡分布の変化を図-3に示す。圧送後に直径 $20\sim50\mu\text{m}$ の気泡の個数が増加する傾向が認められた。これはモルタルが輸送中に配管内でせん断変形を受けることにより気泡が細分化されたためと考えられ、このことがポンプ出口部から筒先にかけての流動性の

向上に影響を及ぼしていると考えられる。その他、ポンプ圧送中のモルタルの洗い試験による配合の変化や骨材の粒度分布の変化等を調べたがこれらの変化は認められなかった。

V漏斗流下時間と吐出量との関係を図-4に、V漏斗流下時間とポンプ出口部の最大圧送圧力との関係を図-5に示す。ポンプ圧送時のモルタルの採取場所にかかわらずV漏斗流下時間と吐出量には負の相関が認められ、また、V漏斗流下時間と圧送圧力には正の相関が認められた。V漏斗流下時間が短いほど、つまり粘性が低いほど吐出量が多く、また、圧送圧力も低くなり、圧送性に優れる。セメントでは、NCに比べて高ビーライト系のLCおよびHLCが、また、混和材としてLPやSFを使用した場合に圧送性に優れると考えられる。

また、ポンプ圧送前後の圧縮強度を図-6に示す。圧送前後の圧縮強度に差は認められない。

3.2 静的加圧および再練混ぜによる品質変化

コンクリートに静的な加圧およびその後に再練混ぜによるせん断変形を与えた場合のスランプフローと○漏斗流下時間の変化を図-7に示す。加圧によりいずれのコンクリートもスランプフローが低下し、○漏斗流下時間が長くなつた。また、その後の再練混ぜによりスランプフローが大きく、○漏斗流下時間が短くなり流動性が回復する傾向が認められた。これらの品質変化は、SFで置換したほうが小さくなつた。

このような静的加圧および再練混ぜによる品質変化は、前述3.1のポンプ圧送によるポンプ出口部および筒先における品質変化と同様の傾向を示したことから、ポンプ圧送中の品質変化の傾向を再現できていると考えられる。

モルタルのポンプ圧送中のホッパからポンプ出口部にかけての品質変化と、静的加圧による品質変化との関係を図-8に示す。概ね静的加圧による○打フローおよびV漏斗流下時間の変化が大きいほど、ポンプ出口部でのそれらの変化も大きくなる傾向が認められる。

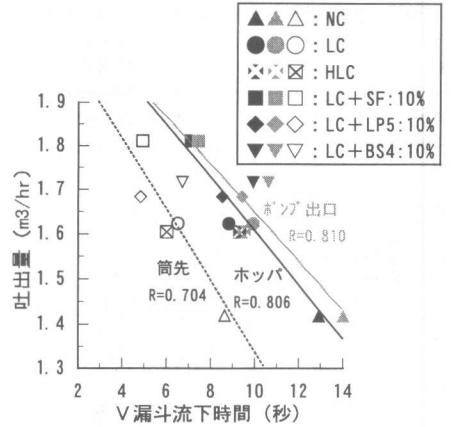


図-4 V漏斗流下時間と吐出量との関係

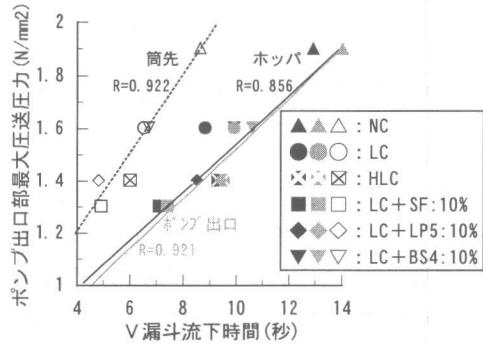


図-5 V漏斗流下時間と圧送圧力との関係

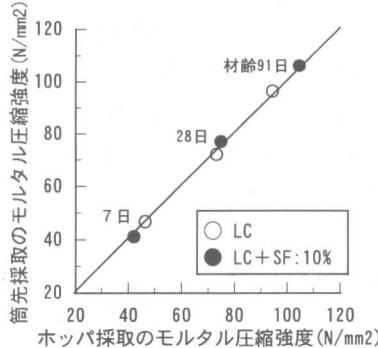


図-6 圧送前後のモルタルの圧縮強度

以上のことおよび3.1の結果を考え合わせれば、本実験の範囲では圧送性は漏斗流下時間が短く、すなわち粘性が低いほうが良く、また、圧送圧力は圧送前の粘性に加えてホッパからポンプ出口部にかけてフローの低下および漏斗流下時間の増大傾向が顕著になるほど高くなることおよび圧送前後の品質の差が小さいほど品質

管理上有利になると考えられることから、静的加圧によるフローおよび漏斗流下時間の変化が小さいものほど圧送性に優れると考えられる。従って、静的加圧による品質変化の傾向から圧送性を相対的に判断できると考えられる。なお、コンクリートの圧送の場合には粘性が低いと粗骨材とモルタルの分離により圧送性の低下を招く可能性があるが、対象とする低水結合材比の高強度コンクリートの場合には、一般的のコンクリートに比べて非常に粘性が高いことから、こうした影響は小さく、モルタルの圧送性からコンクリートについても判断できるのではないかと考えられる。

3.3 セメントおよび混和材の種類の違いが静的加圧によるモルタルの品質変化に及ぼす影響

セメントの種類の違いが静的加圧による品質変化に及ぼす影響を図-9に示す。いずれのセメントも、静置に比べて加圧後には流動性が低下し、全体的には、V漏斗流下時間が長いほど0打フローの低下が大きくなる傾向が認められた。0打フローの低下は、NCが最も大きく、次いでSRC、ビーライト系セメントの順になった。V漏斗流下時間は、NCが最も長く、次いでMC、SRCおよびMC以外のビーライト系セメントの順になった。ビーライト系セメントではビーライト量が多いほどV漏斗流下時間が短くなる傾向が認められた。これらのことより、セメントの種類ではNCに比べて高ビーライト系のセメントのほうがポンプ圧送性に優れると考えられる。

LCあるいはNCに混和材を添加した場合の静的加圧によるモルタルの品質変化を図-10に示す。ベースセメントをLCとし、SFを混合した場合には、0打フローの変化が無置換あるいは他の混和材に比べて小さく、また、V漏斗流下時間も短く、最もポンプ圧送性に優れると考えられる。LPを混合した場合には、粉末度にかかわらず0打フローの変化率は無置換の場合とほぼ同等であったが、V漏斗流下時間は

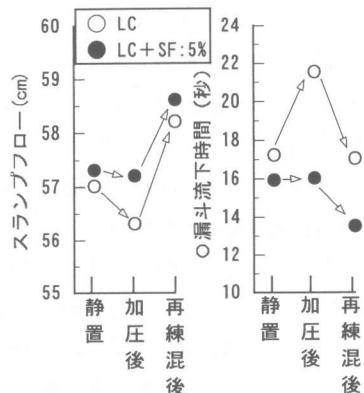


図-7 静的加圧および再練り混ぜを行った場合のコンクリートの品質変化

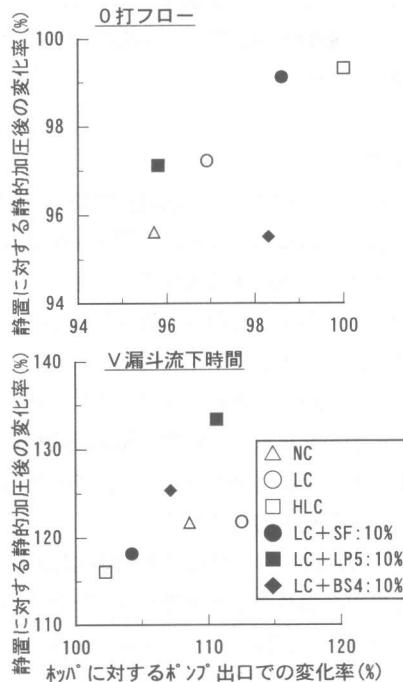


図-8 ポンプ圧送中の品質変化と静的加圧による品質変化との関係

短くなる傾向を示し、ポンプ圧送性の改善には効果があるものと考えられる。FAおよびBSの場合には、V漏斗流下時間は無置換と同等であった。しかし、0打フローの変化率はFAでは産地の違いにより傾向が大きく異なり、また、BSでは粉末度によって傾向が異なり、FA1およびBS6は無置換と同等であったが、FA2およびBS4は無置換より0打フローの低下が大

きくなった。従って、FA および BS の混合によるポンプ圧送性の改善は期待できないと考えられる。また、BS4 の置換率を 50%と大きくした場合でも 0 打フローの変化率は置換率 10%に比べてやや小さくなるが、V 漏斗流下時間を短くする効果は認められなかった。

一方、ベースセメントが NC の場合、0 打フローの低下率はいずれの混和材も無置換に比べて小さく、また、V 漏斗流下時間を短くする効果が認められ、ポンプ圧送性を大きく改善できると考えられる。しかし、いずれの混和材を使用した場合であっても、V 漏斗流下時間は LC 単味に比べて長く、圧送性に関してはベースセメントの種類の違いによる影響のほうが大きいと考えられる。

4.まとめ

高強度モルタルのポンプ圧送過程での品質変化と静的加圧による品質変化との関連性を検討するとともに、静的加圧によりポンプ圧送性に及ぼすセメントおよび混和材の種類の影響について検討し、以下の主な結果を得た。

(1) ポンプ圧送中のモルタルは、ポンプ部分ではフローが小さくなり、V 漏斗流下時間が長くなることから流動性が低下するが、その後の配管中では流動性の回復を生じる。

(2) ポンプ圧送中の流動性の変化傾向は静的加圧および再練混ぜにより再現でき、圧送中のモルタルは、ポンプ側では主に圧力の影響を受け、筒先側ではせん断変形の影響を主に受けることにより流動性が変化する。

(3) 圧送性の判断は静的加圧によるフローおよび漏斗流下時間の変化から行え、漏斗流下時間で表わされる粘性が低く、加圧によるフローおよび漏斗流下時間の変化が小さいほうが圧送性に優れる。

(4) セメントの種類では高ビーライト系のセメントが圧送性に優れる。また、混和材としてはセメント LC の場合にはシリカフュームおよび石灰石微粉末が、セメント NC の場合には

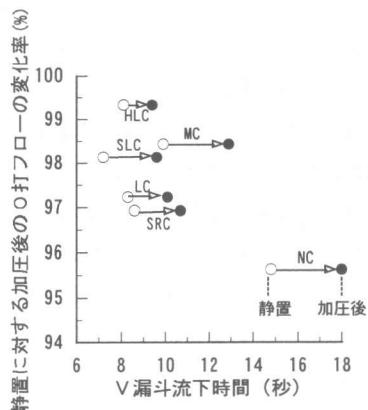


図-9 静的加圧によるV漏斗流下時間と0打フローの変化
(セメントの種類の影響)

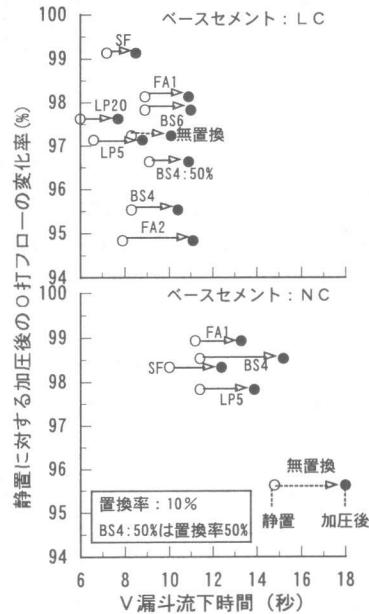


図-10 静的加圧によるV漏斗流下時間と0打フローの変化
(混和材の種類の影響)

それらに加えフライアッシュや高炉スラグ微粉末も圧送性の向上に有効である。

参考文献

- 1) 例えば竹田宣典ほか：高流动コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16.No.1, pp.231-236, 1994
- 2) 大友健ほか：高流动コンクリートのスランプフローオフに関する実験的研究、第2回超流动コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.33-38, 1994
- 3) 横井謙二ほか：高流动コンクリートのポンプ圧送時の性状変化に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19.No.1, pp.103-108, 1997