

## 高強度コンクリートのポンプ圧送実験

有馬 義人 佐々木 仁

塩田 博之<sup>\*1</sup>

### 概 要

近年では、建物の高層化や大スパン化に伴い躯体コンクリートの高強度化が求められている。現場でコンクリートの打設を行う場合には、主にポンプ圧送が用いられるが、ポンプ圧送に先立っては、適切なポンプ圧送能力の算定や機種を選定が必要不可欠である。

高強度コンクリートの場合、高い圧縮強度を確保するために、特殊なセメント、骨材を使用して作製し、単位セメント量が多く粘性が高いため、品質が良く確実な圧入施工を行なうには、ポンプ圧送性やコンクリート性状に与える圧送の影響について、十分に把握しておく必要がある。

2008年において、設計基準強度(以下  $F_c$  と表記) 36、60、80N/mm<sup>2</sup> のコンクリートを用いたポンプ圧送実験を行い、2009年度フジタ技術研究報告45号にて報告を行った。

本報では、さらに  $F_c100$  および 120N/mm<sup>2</sup> のコンクリートを用いたポンプ圧送実験を実施し、ポンプ圧送性およびコンクリートの性状に与える圧送の影響について検討した。また本報では、2つの実験結果を1つにまとめ、考察を行った。

以下に検討結果をまとめる。

- 1) ポンプ圧送によって、コンクリートのスランプフローは低下し、空気量は増加した。それらの変動率は強度が低いコンクリートの方が大きくなる傾向にあった。
- 2) 圧送による圧縮強度およびヤング係数への影響はほとんどなかった。
- 3) 圧送負荷の算定は、実吐出量 30m<sup>3</sup>/h の場合、 $F_c100$  では 6~7K、 $F_c120$  では 13~14K となり、強度の上昇により大きくなった。

### Pumping tests with High-strength Concrete to investigate variations in quality of the pumped concrete

#### Abstract

Recently increased demand for high rise buildings and long span structures has led to a greater demand for increased strength in concrete.

Before casting the concrete using a concrete placer pump, it is essential to select the concrete placer pump model and to calculate the appropriate pumping capacity. In order to ensure a high compressive strength, high-strength concrete is fabricated using a special cement, aggregate, and a large amount cement to make the concrete highly viscous. Therefore, it is necessary to understand the effects of changing the ratio of materials in order to create consistent, pumpable concrete.

In 2008, pumping tests of concrete with the strength design criteria (below referred to as  $F_c$ ) 36,60,80 N/mm<sup>2</sup> were undertaken, and reported by Fujita Technical Report No. 45 in 2009. In this report, Pumping tests that used high-strength concrete of  $F_c100$ , 120 were carried out. The following results were obtained ;

- 1) With delivery by pumping, the slump flow decreases, and air content increases. The volatility tends to be more significant low strength concrete.
- 2) Effect on compressive strength and modulus in pumping was little.
- 3) The pumping pressure loss should be assumed to be 6~7K in  $F_c100$ , 13~14K in  $F_c120$ . The pumping load increases with increasing concrete strength.

キーワード: ポンプ圧送 高強度コンクリート  
コンクリート性状 管内圧力  
圧力損失

\*1 首都圏支社 建築技術部

§1. はじめに

近年の建物高層化や大スパン化に伴い、躯体コンクリートの高強度化が求められている。また高強度コンクリートの作製においては、高い強度発現を可能にするために特殊なセメント、骨材を用いて作製する。その配合計画、セメント量が多く、粘性が普通コンクリートに比べて高いことも高強度コンクリートの特徴でもある。

現場においてコンクリートを打設する場合は、主にポンプ圧送が用いられる。ポンプ圧送による打設を計画する場合には、事前に適切な圧送計画を立て、ポンプ車や機種種の算定を行わなくてはならない。特に、特殊な配合計画を行う高強度コンクリートにおいては、ポンプ圧送性やコンクリート性状に与える圧送の影響について十分に把握しておく必要がある。

本報では 2008 年および 2010 年に行ったコンクリート設計基準強度(以下  $F_c$  と呼ぶ)  $36\text{N/mm}^2 \sim 120\text{N/mm}^2$  における高強度コンクリートのポンプ圧送実験の結果を報告する。

また本実験では、圧送性を計測するとともに、圧送前後での供試体の性状を計測することで、ポンプ圧送がコンクリートに与える影響について考察した。

なお、本報に示す諸条件は 2010 年における実験のものであり、2008 年における実験( $F_c36, 60, 80\text{N/mm}^2$ 、以下  $F_c36, 60, 80$  と呼ぶ)は 2009 年フジタ技術研究報告 第 45 号 Ⅲに記載のため、実験結果のみ記載する。

ここで本報では、コンクリートの種別については、JASS5 の定義に従い、 $F_c36\text{N/mm}^2$  以上のコンクリートを高強度コンクリートと定義している。特に、 $F_c60\text{N/mm}^2$  以上のコンクリートは超高強度コンクリートと呼ぶ。

§2. 実験概要

2.1 コンクリートの概要

$F_c100, 120\text{N/mm}^2$ (以下、 $F_c100, 120$  と呼ぶ)のコンクリートの使用材料および計画調合を表 1 および表 2 に示す。コンクリートの試験項目と試験方法を表 3 に示す。フレッシュコンクリートは、出荷前、荷卸し時および圧送終了後に筒先よりそれぞれ試料を採取して、フレッシュ性状試験および圧縮試験用供試体の作成を行い、圧送によるコンクリート性状への影響を確認した。供試体の養生は  $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$  の恒温室内での標準養生とし、圧縮試験は材齢 7、28、91 日で実施し、ヤング係数については 28 日に計測した。

なお、合成繊維は出荷時に工場で混入させている。

表 1 使用材料

材 料	種 類	産 地	備 考
結合材(B)	シカフーム混入セメント	-	密度 $3.08\text{g/cm}^3$
細骨材(S)	砕砂	茨城県桜川市	表乾密度 $2.59\text{g/cm}^3$
粗骨材(G)	砕石(2005)	茨城県桜川市	表乾密度 $2.65\text{g/cm}^3$
練混ぜ水(W)	上水道水	-	
混和剤	高性能減水剤	-	
膨張材	石灰系膨張材	-	密度 $3.19\text{g/cm}^3$
収縮低減剤	ポリエーテル誘導体	-	

表 2 コンクリートの計画調合

$F_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	W/B (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )							合成繊維 ( $\text{kg/m}^3$ )
		W	B	S	G	混和剤	膨張材	収縮低減剤	
100	17.6	155	856	606	822	23.7	25	5	1.82
120	14	155	1087	471	822	32.6	25	5	1.82

表 3 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	出荷		荷卸し		
		合成繊維 投入前	合成繊維 投入後	荷卸し時	筒先	
フレッシュ コンクリート	スランプフロー	JIS A 1150	○	○	○	○
	空気量	JIS A 1128	○	○	○	○
	コンクリート温度	JIS A 1156	○	○	○	○
	塩化物量	JIS A 1144	-	○	○	-
	単位水量	ZKT-210	-	○	○	○
硬化 コンクリート	圧縮強度(標準 7D, 28D, 91D)	JIS A 1108	○	○	○	○
	ヤング係数(1/3割線弾性係数)	JIS A 1149	-	-	○(28D)	○(28D)

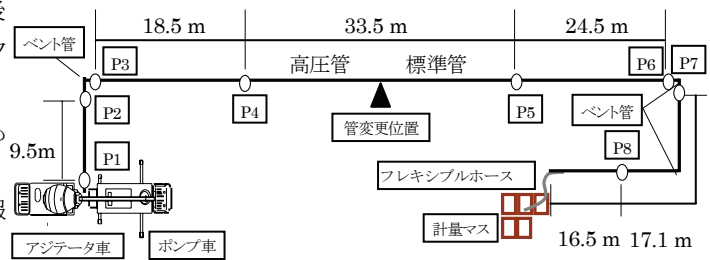


図 1 配管および圧力計配置図

表 4 ポンプ車仕様

コンクリート強度	$F_c36,60,80$	$F_c100,120$
仕様	ピストン式超高压仕様車	ピストン式超高压仕様車
高圧仕様時 最大理論吐出量	11.9MPa	14.5MPa
コンクリートシリンダー径 × ストローク長	$\phi 205 \times 1600\text{mm}$	$\phi 215 \times 2000\text{mm}$

表 5 ポンプ圧送実験測定項目

測定項目	単位	測定方法
理論吐出圧力	MPa	主油圧×シリンダ面積比(0.4)
管内圧力	MPa	フラッシュダイヤフラム型圧力計の数値を動いずみ計で計測
管内圧力損失	kPa/m	(隣接する圧力計間の圧力差)/(圧力計間距離)
ストローク数	回/分	10ストロークに要する時間
実吐出量	$\text{m}^3/\text{h}$	(10ストローク分の充填高さ)/(要する時間)
理論吐出量	$\text{m}^3/\text{h}$	(ポンプ車のコンクリートシリンダ容積)×(単位時間当たりのストローク回数)
容積効率	%	(実吐出量)/(理論吐出量)×100

2.2 ポンプ圧送概要

各実験における配管および圧力測定計配置図を図 1 に、実験に使用したアジテータ車の仕様を表 4 に示す。ポンプ車は、ピストン式超高压仕様車(高圧仕様時最大理論と吐出圧力  $14.5\text{MPa}$ 、コンクリートシリンダー径×ストローク長  $\phi 215\text{mm} \times 2000\text{mm}$ )を用いた。また、ポンプ

圧送実験の測定項目を表 5 に示す。ポンプ圧送実験は 2008 年と同様に 6 月に実施した。

圧送速度は 20、30、40m<sup>3</sup>/h の 3 水準とし、アジテータ車 1 台 (4.2m<sup>3</sup>) の中で 3 段階に変化させ、それぞれの調合で測定を行った。配管長は約 125m とし、125A 高圧管と標準管を併用した。図 1 中の ▲ に示す位置で管の切替えを行っている。ポンプ圧送時の管内圧力は、圧力計を用いて計 8 箇所 (P1～P8) で測定を行った。

### §3. 物性試験結果

#### 3.1 フレッシュコンクリートの性状

スランブフローの圧送前後における変化を図 2 に示す。また、空気量の圧送前後における変化を図 3 に示す。図 2 より、スランブフローは試験までの経時変化の影響も含まれるが、圧送後の筒先で低下を示した。Fc80 以上では約 10% の低下であったが、Fc60 では約 20%、Fc36 で約 40% の低下となり、強度が低いものほどスランブフローの低下率が大きくなった。また図 3 より、空気量はスランブフローの低下とは逆に圧送後は増加の傾向があり、概ね 1.5～2 倍の増加量を示した。空気量の増加率は、強度が低いもののほうがやや大きくなる傾向が見られた。

圧送後ではスランブフローは低下するが、空気量はやや増加するという傾向は既往の研究<sup>2)</sup>によっても指摘されている傾向であり、本実験においても同様の傾向が見られた。

なお荷卸時の試験は、Fc36～80 で各調合とも出荷から 30 分後に実施した。Fc100 は注水から 92 分後、Fc120 は注水から 109 分後に実施した。また圧送後の試験は、Fc36 および Fc60 は荷卸から約 30 分後、Fc80 は約 50 分後、Fc100 および Fc120 はともに約 45 分後に実施した。

#### 3.2 硬化コンクリートの性状

圧縮強度の圧送前後における変化を図 4 に、ヤング係数の圧送前後における変化を図 5 に示す。

圧送後の筒先から採取した供試体の圧縮強度およびヤング係数はともに圧送前後では概ね同等であったが、最大で 10% 程度低下するものも見られた。この低下はポンプ圧送による空気量の増加が原因であると考えられる。圧縮強度とヤング係数の関係を図 6 に示す。図中に示す曲線は Fc36 以上に対応した RC 規準式<sup>3)4)</sup>である。圧送前後で圧縮強度とヤング係数との関係に大きな変化は見られなかった。圧縮強度が大きくなるとヤング係数も大きくなる発現性を示した。RC 規準の評価式に対して、+10%～-25% の範囲内であった。

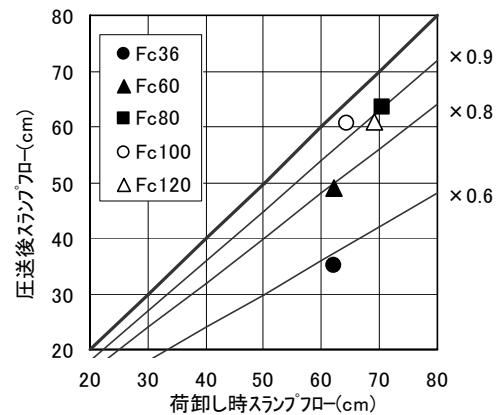


図 2 スランブフローの圧送後の変化

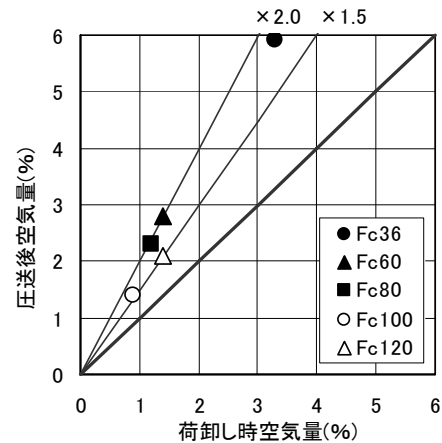


図 3 空気量の圧送後の変化

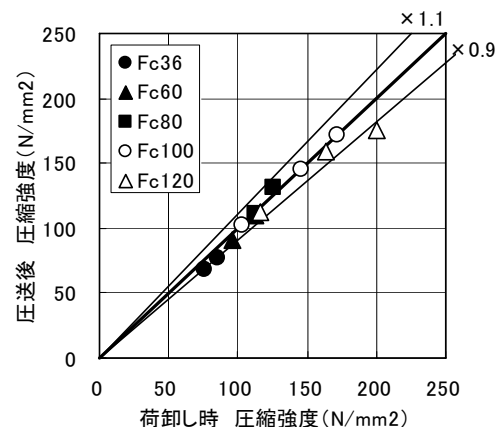


図 4 圧縮強度の圧送後の変化

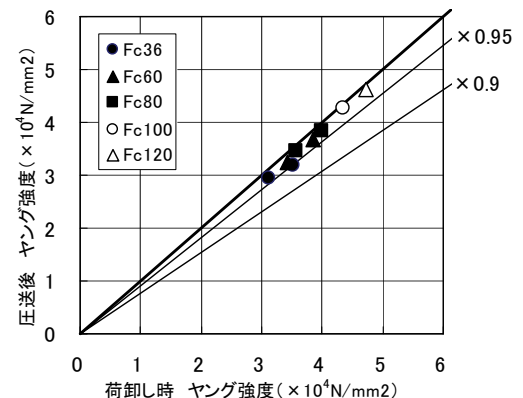


図 5 ヤング係数の圧送後の変化

## §4. ポンプ圧送実験結果

### 4.1 管内圧力波形

Fc100 および Fc120 のコンクリート圧送時の管内圧力波形を図 7 に示す。管内圧力波形については、設定吐出量が最も大きい設定吐出量 40m<sup>3</sup>/h での波形を示す。図 7 に示す凡例は、図 1 に示す圧力計に対応している。1 ストロークの管内圧力変動は、Fc100 および 120 とともに同様の傾向を示し、ピストンの前進とともに立ち上がりの圧力変動が大きく、その後は緩やかに上昇し、ピークでは大きな変動もなく定常状態を示した。配管根元に近いほど立ち上がりの圧力勾配は急となった。また、強度が大きいほど管内の圧力は大きくなった。なお管内圧力波形は、小さい設定吐出量でも同様の傾向を示した。

### 4.2 実吐出量と容積効率

実吐出量と容積効率の関係を図 8 に示す。実吐出量は、10 ストローク分の計測マスの充填量を 10 ストロークに要した時間で除することで算出した。容積率は、実吐出量と理論吐出量との比率である。Fc36 から Fc80 においては、実吐出量が大きくなると、容積効率も上昇する傾向にあった。しかし Fc100 および Fc120 では、それとは逆に、実吐出量を大きくすると、容積効率は減少する傾向にあった。これは、より強度の高いコンクリートとするため、セメント量が多く必要となり、粘性が高いため、ポンプ車のコンクリートシリンダーへの吸引量が低下してしまうことが要因ではないかと考えられる。

### 4.3 管内圧力分布

Fc100 および Fc120 の管内圧力分布を図 9 に示す。ここに示す管内圧力は、1 ストローク間のほぼフラットなピークのうち最大値を用いて、各圧力計および設定吐出量ごとに安定した 5 ストローク分を採取し、その平均値として求めた値である。図 9 より管内圧力は、コンクリートの強度が高く、設定吐出量が大きいほど増加した。また、配管根元で最も大きくなり、概ね直線的に減少した。配管条件は異なるが、Fc36 から Fc80 の実験時に計測した管内圧力分布の傾向と同様の傾向を示した。

### 4.4 実吐出量と理論吐出圧力

実吐出量と理論吐出圧力の関係を図 10 に示す。ポンプ車の理論吐出圧力は、主油圧とシリンダー面積比 (= (主油圧シリンダー内径)<sup>2</sup> / (コンクリートシリンダー内径)<sup>2</sup>) の積により求めた。図中の点線および実線は、理論吐出量と理論吐出圧力の関係によって示される実験に使用したポンプ車の性能曲線である。理

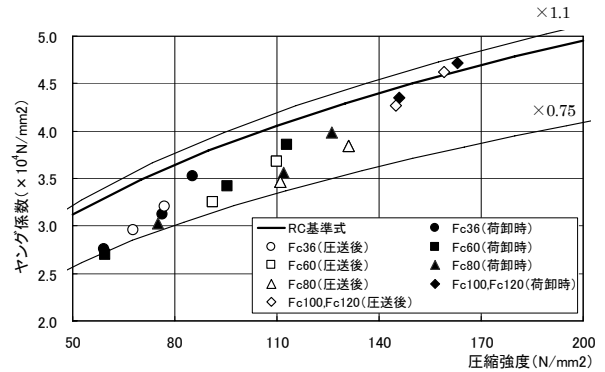


図 6 圧縮強度-ヤング係数関係

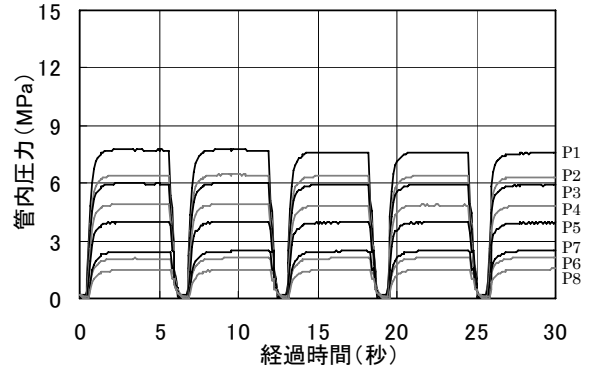


図 7(a) Fc100

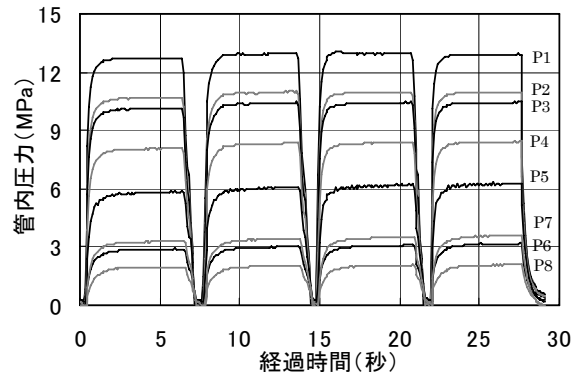


図 7(b) Fc120

図 7 管内圧力波形  
(設定吐出量 40m<sup>3</sup>/h の場合)

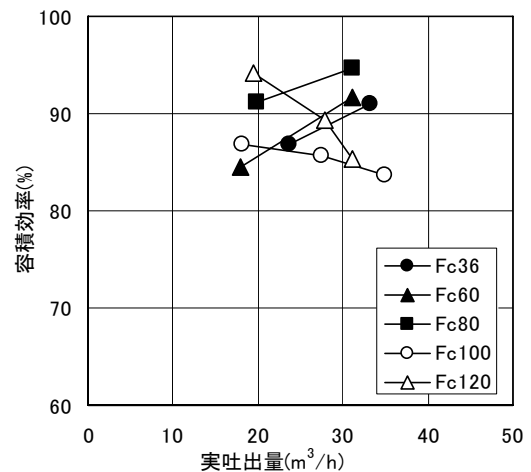


図 8 実吐出量-容積効率関係

論吐出圧力は、実吐出量が大きくなるに伴って高くなり、強度が高いものほど、より圧力の増加が顕著である。  
Fc100 では、実吐出量 35m<sup>3</sup>/h 程度までならば、本実験で使用したポンプ車であれば、標準仕様で圧送可能であることがわかった。Fc120 では、実吐出量が 25m<sup>3</sup>/h を超える場合は高圧仕様とする必要がある。特に、実吐出量 30m<sup>3</sup>/h では、ポンプ車性能の限界に近いことがわかった。

Fc80 においても、実吐出量 30m<sup>3</sup>/h 程度でポンプ車性能の限界に近い値となっていた。

#### 4.5 実吐出量と管内圧力損失

実吐出量と管内圧力損失の関係を図 11 に示す。図中に、「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」<sup>5)</sup>の解説に示されたスランブ 21cm の普通コンクリートにおける実吐出量と管内圧力損失の関係を表す「K」を比較のため示す。

管内圧力損失は、平均的な値を算出するために水平直管部の P3-P6 間の管内圧力差を圧力計間距離で除して求めた。管内圧力損失は、一様にコンクリートの強度が高く、設定吐出量が大きいくほど増加した。強度の高いコンクリートのほうが圧力損失の増加率も大きくなった。また管内圧力損失は、配管根元に近いベント管で最も大きく、水平管中央部で最も小さくなった。

実吐出量 30m<sup>3</sup>/h の場合では、Fc36 で 3K、Fc60 で 5K、Fc80 および Fc100 で 6~7K、Fc120 で 13~14K 程度の管内圧力損失を設定する必要があった。

強度が大きいコンクリートでは、十分な圧送負荷を考慮し、ポンプ車の選定を行わなくてはならない。

#### §5. まとめ

Fc100 および Fc120 のコンクリートのポンプ圧送実験を行った。本実験および 2008 年に行った Fc36~80 のポンプ圧送実験により得られた知見を、以下にまとめる。

- 1) ポンプ圧送の前後にコンクリートを採取し、スランブフロー試験および空気量試験を行った。その結果、スランブフローは低下するが、空気量はやや増加する傾向となった。それらの値は、強度が低いものほど変化率は顕著であった。
- 2) ポンプ圧送前後のコンクリートを採取し、圧縮試験の供試体を作成した。コンクリートの圧縮強度およびヤング係数の値は、圧送による影響はほとんどなく、圧送前後の供試体で同程度の値を示した。
- 3) ポンプ圧送実験により、Fc100 以上となるような高強

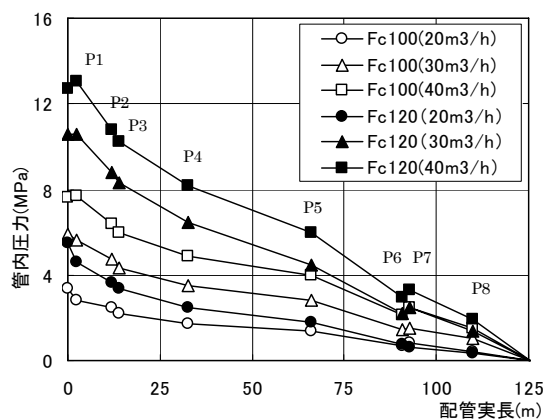


図 9 管内圧力分布

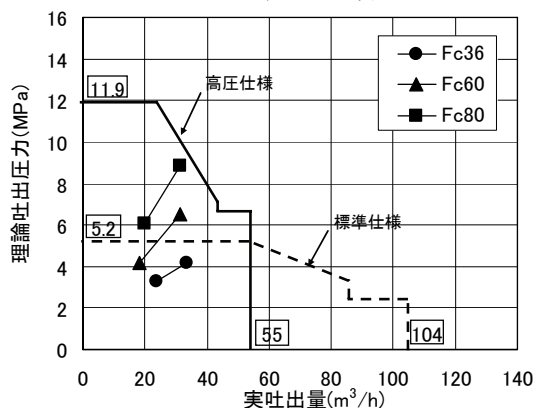


図 10(a) Fc36~Fc80

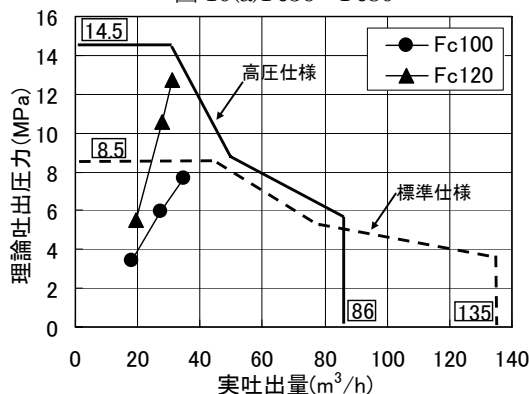


図 10(b) Fc100~Fc120

図 10 実吐出量-理論吐出圧力関係

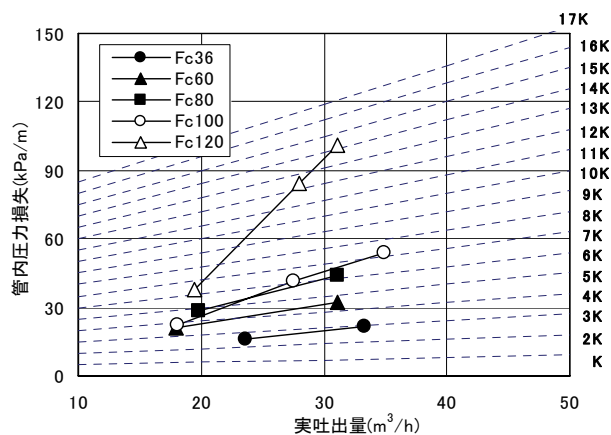


図 11 実吐出量-管内圧力損失関係

度コンクリートの場合、吐出量を大きくすると、実績効率が減少する傾向となった。これは高強度コンクリートの配合の性質上、セメント量が多くなるため、粘性が大きくなり、ポンプ車のコンクリートシリンダーへの吸引量が減少してしまうことが要因であると考えられる。

- 4) 本実験で使用したポンプ車を用いる場合、Fc100 ならば標準仕様で圧送可能である。Fc120 では実吐出量  $25\text{m}^3/\text{h}$  以上の場合、高圧仕様とすれば圧送可能であるが、実吐出量  $30\text{m}^3/\text{h}$  となると、ポンプ車性能の限界に近い値となった。Fc80 の場合も、高圧仕様で実吐出量  $30\text{m}^3/\text{h}$  の時、ポンプ車の限界に近い値となった。
- 5) 圧送負荷の検討においては、強度が大きくなるほど大きくなった。実吐出量  $30\text{m}^3/\text{h}$  の場合、Fc100 は 6～7K、Fc120 は 13～14K 程度の管内圧力損失を設定する必要がある。強度が大きいコンクリートは十分な圧送負荷を考慮し、ポンプ車の選定を行わなくてはならない。

#### 参考文献

- 1)片寄哲務,西田浩和ほか 3 名;高強度コンクリートのポンプ圧送性と CFT 圧入施工性に関する実験的検討,フジタ技術研究報告第 45 号,pp73-78.
- 2)神代泰道,一瀬賢一,都築正則;高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol28,No.1.pp.1217-1222,2006
- 3)国土交通省建築研究所;鉄筋コンクリート造建物の超軽量化・超高層化技術の開発,建築研究報告 No139,2001.02
- 4)日本建築学会;鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010,2010 年第 8 版
- 5)日本建築学会;コンクリートポンプ工法施工指針・同解説,2009 年第 4 版

#### ひとこと

今後も、施工性の向上や品質確保について、技術面からのサポートをしていきたいと思っております。



有馬 義人