

設計基準強度50～120N/mm²に対応する高強度コンクリートのポンプ圧送性の簡易的予測方法の提案

神代泰道 都築正則
一瀬賢一 堀長生

Proposal of a Method of Simply Forecasting the Pumpability of Fc=50-120MPa-class High-strength Concrete

Yasumichi Koshiro Masanori Tsuzuki
Ken'ichi Ichise Nagao Hori

Abstract

It is normally difficult to place high-strength concrete by pumping, so it is necessary to confirm its pumpability. A pumping test was carried out on Fc=50-120MPa-class high-strength concrete to determine changes in concrete quality and pump pressure loss. The test showed that concrete viscosity and slump flow decreased. Furthermore, the compression strength remained almost constant, although the amount of air increased. The pressure loss increased linearly with concrete C/W and decreased when zirconia silica-fume was used. A method of simply forecasting the pressure loss was shown by considering the high-strength concrete to be a Bingham fluid.

概要

設計基準強度が50から120N/mm²に対応する高強度コンクリートを対象とし、ポンプ圧送実験を行い、ポンプ圧送によるコンクリートの品質の変化及びポンプ圧力損失を確認した。その結果、ポンプ圧送によりスランプフローは低下するが、コンクリートの粘性は小さくなる傾向であった。また、空気量は若干増加するものの、圧縮強度はほとんど変わらなかった。水セメント比が小さいほど、圧力損失は吐出量の増加に伴い大きくなり、ジルコニア起源シリカフュームを混入した高強度コンクリートの場合、圧送による流動性の低下は小さく、圧力損失も低減し、ポンプ圧送性が改善された。これらの実験結果を用いて、高強度コンクリートをビンガム流体と仮定し、ポンプ圧力損失を簡易的に予測する方法について示した。

1. はじめに

近年、超高層CFT建物のポンプ圧入施工¹⁾など、高強度コンクリートをポンプで圧送する事例が増加している。高強度コンクリートは一般強度のコンクリートに比べて、圧力損失（配管1mあたりの圧力損失）が大きくなることから、打設に際しては、事前にポンプ圧送実験を行うなど、ポンプ圧送性の確認が必要となる。特に、設計基準強度が100N/mm²を超えるコンクリートのポンプ圧送性に関する報告事例²⁾はあるが、極めて少ないのが現状である。今回、中庸熟ポルトランドセメント及びジルコニア起源シリカフュームをプレミックスしたセメントを用い、設計基準強度が50から120N/mm²に対応する高強度コンクリートを対象として、ポンプ圧送実験を行った。本報では、ポンプ圧送によるコンクリートの品質の変化及びポンプ圧力損失の測定結果を述べるとともに、圧力損失に及ぼす影響要因について考察・検討を行った。さらに、高強度コンクリートを降伏値と塑性粘度をもつビンガム流体と仮定し、ポンプ圧送実験で得られたデータを用いて、圧力損失を簡易的に予測する方法を提案した。

2. 実験概要

2.1 実施概要

ポンプ圧送実験は、設計基準強度が50から120N/mm²に対応する6種類の高強度コンクリートについて行った。実施時期は、スランプフローのロスなどのフレッシュコンクリートの品質変化が大きくなると予想される夏期とした。

2.2 コンクリートの使用材料及び調合

設計基準強度（以下、Fc）50から80N/mm²に対応する高強度コンクリートについては、中庸熟ポルトランドセメントを用い、建築基準法第37条2項に基づく国土交通大臣の認定を取得した調合とした。

Fc=80から120N/mm²については、ジルコニア起源シリカフューム³⁾を事前に混入した中庸熟ポルトランドセメントセメントベースのプレミックスセメント（ZFC）を用いた。使用材料をTable 1に、コンクリートの調合をTable 2に示す。コンクリートの練混ぜは市中のレディーミクストコンクリート工場において行い、1バッチ2.5m³とし、モルタル先練り方

式とした。W/Cが小さくなるほど練混ぜ時間を長くした。

2.3 圧送条件

配管図をFig. 1に示す。配管は5インチ管を用い、配管長は110mとした。これはCFT造の建物において5~6階から圧入施工(水平管60m, 鉛直管25m程度)する圧送条件にほぼ相当するものである。配管種類は、根元から60mまでをZ配管, 80mまでを高圧(H)配管, それ以降を中圧(M)配管及び一般(S)配管とし、ポンプ車に近いほど高圧に耐えられるようにした。ポンプ車の諸元をTable 3に示す。ポンプ車はP社製のピストン式高圧ポンプ車とし、低圧モード(最大吐出圧15MPa)で実施した。各コンクリートの間では、配管内の残留コンクリートを十分に入れ替えるため、30ストローク圧送してから計測を開始した。吐出量は15~50m³/hの間の4水準とし、1回あたりのストローク間隔で調整した。各吐出量の水準においては10ストロークずつ圧送した。

2.4 試験項目

試験項目をTable 4に示す。荷卸し及び筒先でコンクリートを採取して試験を行い、それぞれ圧送前後のコンクリートの性状を比較した。フレッシュコンクリートについては、スランブフロー、Oロート流下時間、空気量、コンクリート温度を測定した。硬化コンクリートについては、標準水中養生を行った供試体について、材齢28日及び91日において圧縮強度、静弾性係数を測定した。管内圧力の測定は、フラッシュダイアフラム型圧力計を用い、圧送管にはFig. 2に示すように取り付けた。圧力計の受圧面は、圧送管の管壁より1mm程度内側とし、ここにシリコン樹脂を充填して、受圧面をコーティングした。なお、コーティングによる感度低下がないことを事前に確認した。圧力計は配管内に計6点設置した。ポンプ主油圧は、各吐出量の水準において、定常状態になった時のポンプ車の主油圧を油圧ゲージから読み取った。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果をTable 5に示す。圧送前の試験は練混ぜ開始から約60分後、圧送後の試験は80~90分後に実施した。当日の外気温は28℃であり、コンクリート温度はいずれも30℃を超えた。圧送前後のコンクリートのスラン

Table 1 コンクリートの使用材料
Materials of Concrete

分類	記号	概要
セメント (C)	M	中庸熟セメント, 密度 3.21g/cm ³
	ZFC	ジルコニア起源シリカフォーム混入セメント 密度 3.08g/cm ³ , 置換率 13%
細骨材	S	山砂, 表乾密度 2.59 g/cm ³ 吸水率 2.21%, FM2.62
粗骨材 (G)	G1	石灰岩碎石, 表乾密度 2.70 g/cm ³ 吸水率 0.61%, 実績率 60.0%
	G2	硬質砂岩, 表乾密度 2.70 g/cm ³ 吸水率 0.57%, 実績率 60.7%
混和剤 (SP)	SP1	高性能 AE 減水剤 (K 社製), ホリカルボン酸系
	SP2	高性能減水剤 (S 社製), ホリカルボン酸系

Table 2 コンクリートの割合
Mix Proportion of Concrete

コンクリート 記号	セメント 種類	G 種類	SP 種類	練混ぜ時間(S)		Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				SP (%)
				モルタル	コンクリート				W	C	S	G	
M50	M	G1	SP1	60	60	3.0	35.6	52.0	170	478	878	842	1.30
M60	M	G1	SP1	120	120	3.0	31.7	50.5	170	536	831	842	1.35
M80	M	G1	SP1	180	180	3.0	25.5	47.0	170	667	725	842	1.55
Z80	ZFC	G2	SP2	90	90	2.0	25.0	50.0	155	620	808	842	1.05
Z100	ZFC	G2	SP2	120	120	2.0	20.0	45.6	155	775	678	842	1.075
Z120	ZFC	G2	SP2	150	150	2.0	17.0	41.0	155	912	563	842	1.10

M50, M60 : スランブフロー 65±5cm, 空気量 3.0±1.5%

M80 : スランブフロー 65±7.5cm, 空気量 3.0±1.5%

Z80, Z100, Z120 : スランブフロー 65±7.5cm, 空気量 2.0±1.5%

Table 3 ポンプ車の諸元
Property of Concrete Pump

圧送 モード	最大 吐出圧 (MPa)	最大 吐出量 (m ³ /h)	コンクリートシリカ*			シリカ* 比
			直径 (mm)	長さ (mm)	吐出量 (m ³)	
標準	15	68	200	2100	0.066	0.438

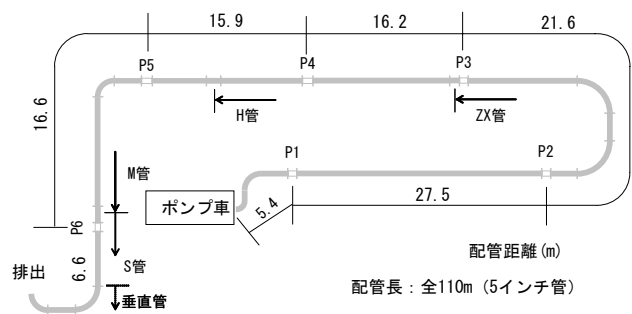


Fig. 1 配管図
Drawing of Concrete Pipe

Table 4 試験項目
Examination Item

項目	内容
圧送前後の コンクリート	スランブフロー, 空気量 Oロート流下試験, コンクリート温度 標準水中養生を行った供試体による圧縮強度, 静弾性係数 (材齢28日, 材齢91日)
管内圧力	吐出量15~50 m ³ /hの4水準において、配管に 設置した6点の圧力計により測定
ポンプ主油圧	各吐出量の定常状態になった時点の最大主 油圧をゲージから読み取る

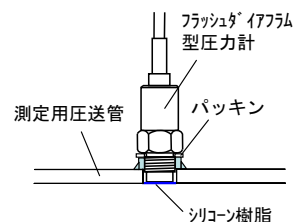


Fig. 2 圧力計設置状況
Pressure Gauge Installation Situation

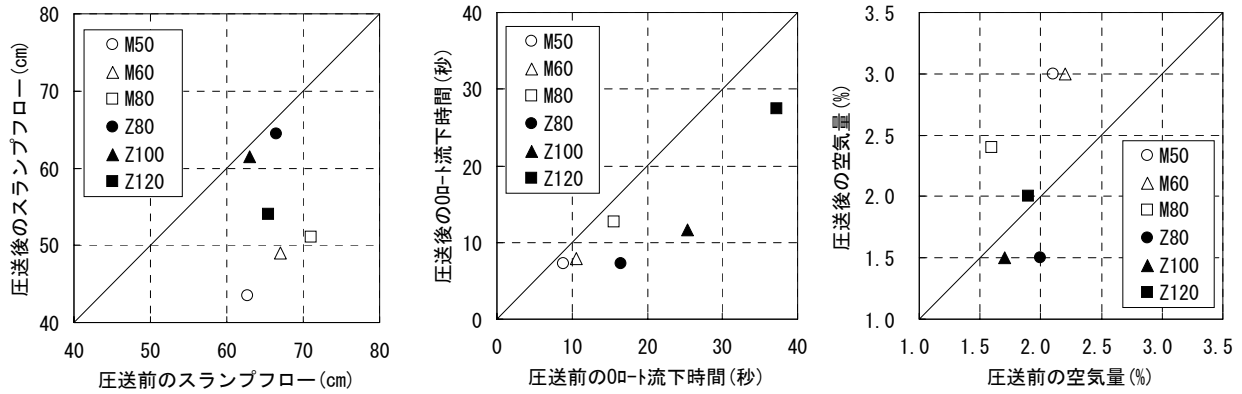


Fig. 3 圧送前後のフレッシュ性状
Fresh Concrete Properties before and after Pumping

プフロー、Oロート流下時間及び空気量を比較してFig. 3に示す。

中庸熟ポルトランドセメント（以下、Mセメント）単体として用いた $F_c=50\sim 80\text{N/mm}^2$ に対応するコンクリート（M50～M80）では、圧送後で20cm程度の比較的大きなスランプフローのロスが見られた。これはコンクリート温度として30℃を超える条件であったこと、最終的な吐出量が $50\text{m}^3/\text{h}$ とかなり早い速度で圧送した後の試料であったことが影響していると考えられる。一方、ジルコニア起源シリカフュームをプレミックスしたセメント（以下、ZFC）を用いた $F_c=80\sim 120\text{N/mm}^2$ に対応するコンクリート（Z80～Z120）については、同じ条件であったが、Z80及びZ100で2～3cm程度、Z120で10cm程度のロスであり、比較的小さかった。Oロート流下時間については、ほとんどのコンクリートで圧送後の方が短くなっており、スランプフローは低下するものの、コンクリートの粘性は小さくなる傾向を示した。特に、ZFCを用いたコンクリートでは、その傾向が強かった。圧送後に粘性が低下するメカニズムについては現時点のところ不明である。空気量については、Mセメントではポンプ圧送により0.8%程度増加する傾向であったが、ZFCを用いたコンクリートではほぼ横ばいか若干低下した。

Table 5 フレッシュコンクリート試験結果
Test Result of Fresh Concrete

記号	測定場所	スランプフロー (cm)	Oロート流下時間 (sec)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	単位容積質量 (kg/m^3)
M50	荷卸	63.0×62.5	8.8	2.1	31.0	2,415
	筒先	44.0×43.0	7.3	3.0	31.5	2,391
M60	荷卸	68.0×66.0	10.6	2.2	32.0	2,445
	筒先	50.0×48.0	7.9	3.0	33.0	2,417
M80	荷卸	71.0×71.0	15.6	1.6	32.5	2,487
	筒先	52.0×50.0	12.7	2.4	32.5	2,454
Z80	荷卸	67.0×66.0	16.5	2.0	31.0	2,476
	筒先	65.0×64.0	7.2	1.5	32.0	2,471
Z100	荷卸	63.0×63.0	25.4	1.7	32.0	2,493
	筒先	62.0×61.0	11.7	1.5	32.0	2,491
Z120	荷卸	66.0×65.0	37.2	1.9	32.5	2,502
	筒先	54.5×53.5	27.5	2.0	34.0	2,492

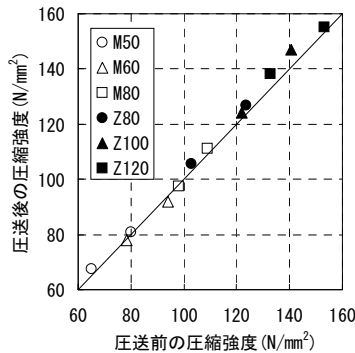


Fig. 4 圧送前後の圧縮強度
Comparison of Compressive Strength before and after Pumping

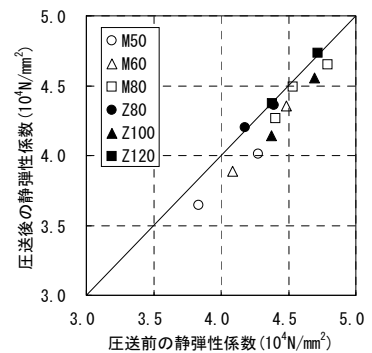


Fig. 5 圧送前後の静弾性係数
Comparison of Young's Module before and after Pumping

3.2 硬化コンクリートの試験結果

圧送前後で採取したコンクリートの材齢28日及び91日における圧縮強度と静弾性係数の試験結果をFig. 4及びFig. 5に示す。圧縮強度については圧送前後では大きな差異は見られなかった。圧送後にフレッシュコンクリートの空気量が増加するものもあったが、圧縮強度に影響はない範囲であった。一方、静弾性係数は圧送後の方が5%程度小さくなった。これは空気量が増大したことにより、単位容積質量が小さくなったためと考えられる。

3.3 管内圧力の測定結果

3.3.1 測定波形 圧力の測定波形の一例をFig. 6に示す。圧力波形は、シリンダー切り替え時に発生するサージ圧がなく、1ストローク間ではほぼ一定の圧力となった。これは今

回使用したポンプ車の油圧回路システムによるものである。各吐出量における圧力値は、定常状態での測定値を読み取った。また、実際の吐出量は、定常状態における1ストロークあたりの時間間隔を求め、これに1ストロークあたりの実吐出量を乗じた。1ストロークあたりの実吐出量は、Table 3に示したコンクリートシリンダ容積に容積効率（これまでの実績値0.85を採用）を乗じ、56リットルとした。コンクリートシリンダーの前面圧(P0)は、ポンプ車の主油圧ゲージから読み取った値に、Table 3に示したシリンダ比(0.438)を乗じて算定した。

3.3.2 管内圧力 各コンクリートの管内圧力の測定結果の一例として、M80、Z80及びZ120の場合をFig. 7に示す。配管

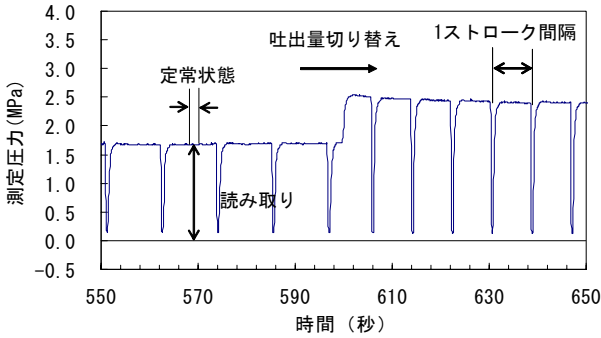


Fig. 6 測定波形の一例 (Z120の場合)
Example of Measurement Wave

距離は実長で示した。P0はコンクリートシリンダーの前面圧とした。測定点P2に設置した圧力計に不具合があったため、P2を除いた。圧力測定結果は、緩やかな下に凸の曲線となり、ポンプ車根元に近づくほど勾配は急となった。本研究では、測定点P1からP6までの圧力に対する最小2乗法による直線の傾きを圧力損失として算定した。

3.3.3 圧力損失 各コンクリートの圧力損失と吐出量の関係をFig. 8に示す。全てのコンクリートの圧力損失は、吐出量に対して直線的に大きくなり、その傾向は、高強度になるほど吐出量に対する増加の割合が大きくなる傾向であった。同じ強度レベルである $F_c=80\text{N/mm}^2$ に対応するM80とZ80を比較すると、Z80の圧力損失の方が30~40%の低減がみられ、吐出量が多いほど、圧力損失の低減効果は大きくなる傾向を示した。

3.4 圧力損失に影響を及ぼす要因

Fig. 8に示した各コンクリートの圧力損失と吐出量の関係から、吐出量20, 30, 40m³/hにおける圧力損失を求め、圧力損失に及ぼす影響要因を考察した。圧力損失とC/Wの関係をFig. 9に示す。コンクリートのC/Wが大きくなる(高強度になる)ほど圧力損失は増加し、吐出量が多いほどその傾向は強くなった。セメント種類で比較すると、Mセメントを用いた $F_c=60$ 及び 80N/mm^2 に対応するC/Wの圧力損失は、ZFCを用いた $F_c=80$ 及び 100N/mm^2 に対応するC/Wの圧力損失とほぼ同等であった。すなわち $F_c=100\text{N/mm}^2$ については、ZFCを用いることでこれまでの $F_c=80\text{N/mm}^2$ と同様の技術レベル¹⁾で施工が可能と言える。一方、 $F_c=120\text{N/mm}^2$ では、圧力損失は増大し、吐出量の影響も大きくなることから、配管距離、吐出量などについては慎重に計画する必要がある。

4. ポンプ圧力損失の簡易的予測方法の提案

4.1 概要

高強度コンクリートのポンプ圧送性を評価するには事前に圧送実験を行うことが推奨されているが、圧送実験に

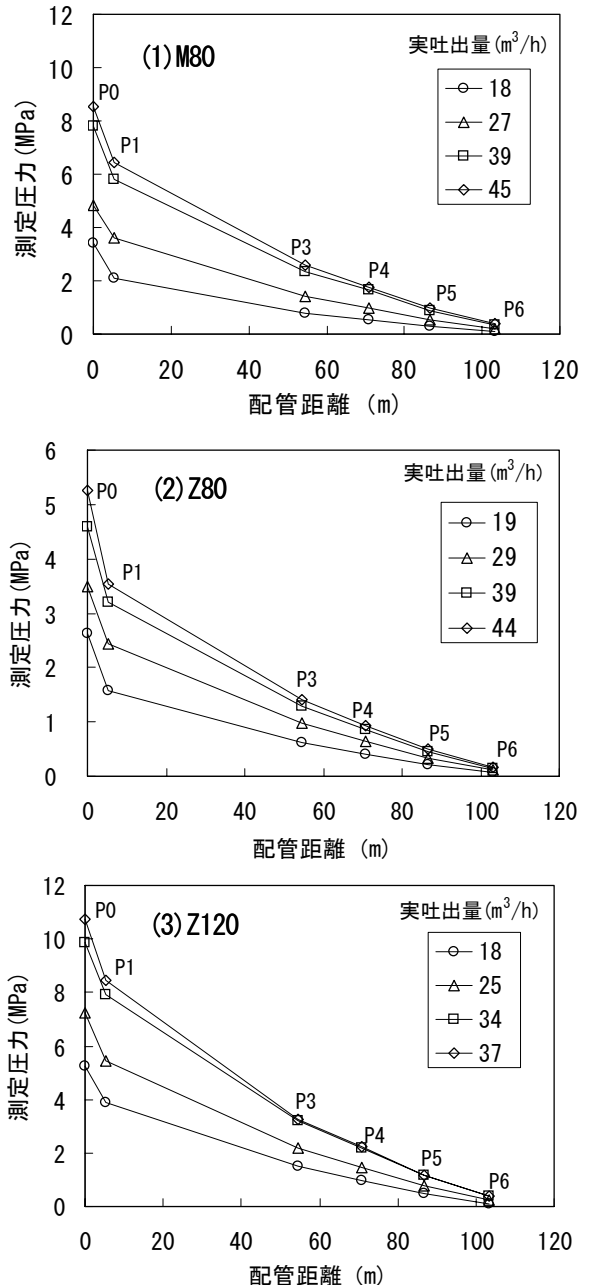


Fig. 7 管内圧力の分布状況
Pumping Pressure vs. Conveying Distance

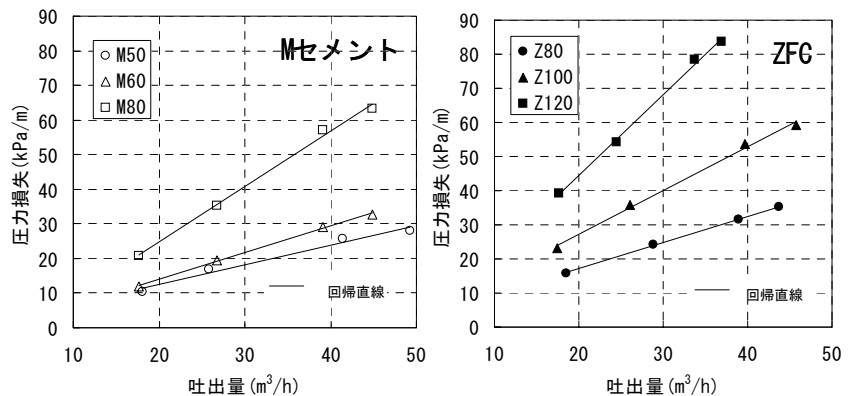


Fig. 8 吐出量と圧力損失の関係
Relation between Concrete Volume and Pump Pressure Loss

伴うコスト増や廃棄物の発生が問題となる。特に高層のCFT造では、施工計画の段階でポンプ圧入工法の採用の可否を判断し、適切なポンプ車の選定及び配管計画を行う必要があり、今後ますます事前のポンプ圧送性の評価は重要となる。ここでは、高強度コンクリートを降伏値と塑性粘度をもつビンガム流体と仮定し、ポンプ圧送実験で得られたデータを用いて、圧力損失を簡易的に予測する方法を提案した。

4.2 配管内の流動状況

配管内における高強度コンクリートの流動は、ビンガム流体が、管壁面においてすべりを伴いながら、流動しているものと考えられる。すなわち、コンクリートの全流量は、(1)式に示すように、すべりによる流量とビンガム流量の和で表される。高強度コンクリートでは、一般強度のコンクリートに比べて水・セメントペーストが分離しにくく、管壁において潤滑層が形成されにくいため、すべり流量は少なくなる。すなわち、(2)式で示す全流量に対するビンガム流量の比率は、高強度になるほど大きくなると予想される。一方、ビンガム流量は、(3)式に示すバッキンガムライナーの式から降伏値と塑性粘度で表すことができる⁴⁾。したがって、ビンガム流量が分かり、降伏値と塑性粘度が推定できれば、圧力損失を予測することができる。

$$Q_A = Q_B + Q_S \quad (1) \text{式}$$

$$Rb = Q_B \times 100 / Q_A \quad (2) \text{式}$$

$$Q_B = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\Delta P}{l} \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right) \quad (3) \text{式}$$

ここで、

- Q_A : 全流量(mm³/s) Q_B : ビンガム流量(mm³/s)
- Q_S : すべり流量(mm³/s) Rb : ビンガム流量比(%)
- R : 管の半径(mm) ΔP : 圧力差(Pa) l : 管の長さ(mm)
- $\Delta P/l$: 圧力損失(Pa/mm) η : 塑性粘度(Pa・s)
- τ_y : 降伏値(Pa) r_0 : 栓流半径(mm)

4.3 降伏値及び塑性粘度の推定

降伏値については、高流動コンクリートを対象として提案されている既往の予測式の中から、回転翼型粘度計による実測値に近い値を推定できる(4)式⁵⁾を選定した。これは、スランプコーンに詰めた流体の運動方程式を導き、静止した状態において底面のせん断応力は流体の降伏値と等しいとする条件から導かれたものである。塑性粘度は、ロート形状の容器の流下時間から塑性粘度を算出する方法⁶⁾を参考とし、オロート流下試験装置にあてはめ、オロート流下時間から塑性粘度を予測する(5)式を導いた。

$$\tau_y = \frac{15^2 \rho G V^2}{4\pi^2 S_f^5} \quad (4) \text{式}$$

$$\eta = \frac{1412t_o \rho}{\alpha} \quad \alpha = 1 - \frac{4\tau_y}{3\tau_R} + \frac{\tau_y^4}{3\tau_R^4} \quad (5) \text{式}$$

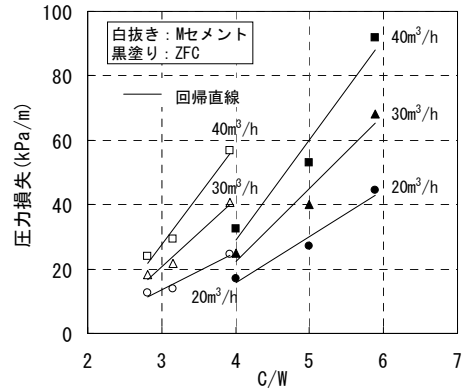


Fig. 9 C/Wと圧力損失の関係
Relation between C/W and Pump Pressure Loss

ここで、

- τ_y : 降伏値(Pa) S_f : スランプフロー(mm) ρ : 密度(g/mm³)
- G : 重力加速度(mm/s²) V : 試料の容量(mm³)
- η : 塑性粘度(Pa・s) t_o : オロート流下時間(s)
- τ_R : 閉塞時の降伏値(Pa)

4.3 ビンガム流量比の算定

今回の高強度コンクリートのポンプ圧送実験結果より、圧送前後のスランプフロー及びオロート流下時間の平均値から(4)式及び(5)式により、降伏値及び塑性粘度を算定した。

塑性粘度と圧力損失の関係をFig. 10に示す。高強度コンクリートの塑性粘度と圧力損失の相関は高い⁷⁾とされるが、本報においてもかなり相関が高いことを確認した。

各コンクリートのビンガム流量比を求めるため、降伏値、塑性粘度の算定結果及び圧力損失を(3)式に代入しビンガム流量を求め、(2)式からビンガム流量比を求めた。なお、吐出量30m³/hの場合とした。ビンガム流量比の算定結果をTable 6に、ビンガム流量比とセメント水比の関係をFig. 11に示す。ビンガム流量比は、Mセメント単体の場合、32~52%の範囲であり、C/Wの増大に伴って増大した。これはC/Wの増大(W/Cの低下)に伴い、水・セメントペーストが分離しにくく、管壁において潤滑層が形成されにくくなるため、すべり流量が減少することを裏付けている。一方、ZFCを用いた場合には、W/Cが低いもののビンガム流量比は40%程度一定となった。これはセメントペースト中に球形の微粒子であるジルコニア起源シリカフェウムが混入しているため、ボールベアリング効果により、管壁でのすべりやすさを促進したものと考えられる。なお、詳細なメカニズムについては今後も検討が必要である。

4.4 ポンプ圧力損失の予測

上記の検討結果より、計画したコンクリートのC/Wに応じたFig. 11からビンガム流量比を求め、スランプフロー及びオロート流下時間の測定結果から降伏値及び塑性粘度を算定し、これらを(3)式に代入することで、圧力損失を算出することができる。ここで求められる圧力損失は、施工計画の段階で、ポンプ圧送負荷を検討する際に用いることができる。

さらに精度よく高強度コンクリートのポンプ圧力損失を予測するには、圧送に伴うフレッシュコンクリートの品質変化のメカニズムと予測及びこれらが圧力損失に及ぼす影響についてまだ解明すべき点が多いが今後の検討課題としたい。

5. まとめ

中庸熟ポルトランドセメント及びジルコニア起源シリカフェームをプレミックスしたセメントを用いた $F_c=50$ から 120N/mm^2 に対応する高強度コンクリートを対象とし、ポンプ圧送実験を行った。その結果、以下のことが分かった。

- 1) ポンプ圧送によりスランブフローは低下するものの、オート流下時間は短くなり、コンクリートの粘性は小さくなる傾向であった。
- 2) ポンプ圧送により空気量は若干増加するが、圧縮強度に影響を及ぼすものではなかった。圧送後の静弾性係数は、圧送前に比べて若干低下する傾向であった。
- 3) 吐出量が多くなるほど圧力損失は増加し、その傾向は水セメント比が小さいほど増加の割合が大きかった。
- 4) ジルコニア起源シリカフェームを混入することで圧送後におけるコンクリートの流動性の低下も小さくなり、また圧力損失も低減し、ポンプ圧送性の改善に効果があることが分かった。
- 5) 高強度コンクリートをビンガム流体と仮定し、各調査毎にビンガム流量比を求めた結果、水セメント比が小さくなるほどビンガム流量比が大きくなり、すべりによる流量が減少した。ジルコニア起源シリカフェームを用いた場合、ビンガム流量比は小さくなった。

なお、実験の遂行にあたり、東京本社建築省力化構工法研究開発チーム（幹事：井上部長）のメンバー及びTBS開発JV工事事務所（鶴田所長）の関係の方々には多大な協力をいただきました。末尾にて謝意を示します。

参考文献

- 1) 秋山猛, 他: 注目建設プロジェクトとコンクリート技術の貢献 電通本社ビルオフィス 棟のCFT施工, コンクリート工学, Vol. 41, NO. 1, p. p. 117-122, 2003
- 2) 鳴瀬浩康, 他: 150N/mm²級超高強度コンクリートに関する実験的研究 (その2 ポンプ圧送による実大柱の施工試験), 日本建築学会大会学術梗概集, p. p. 541-542, 2004
- 3) 神代泰道, 他: ジルコニア起源シリカ質微粉末を用いた超高強度コンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, p. p. 1057-1062, 2005
- 4) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針, コンクリートライブラリー No. 100, 2000

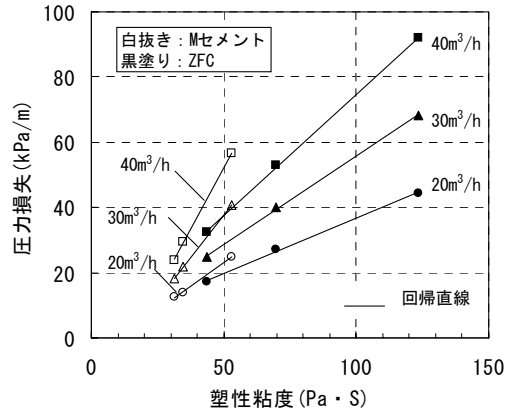


Fig. 10 塑性粘度の推定値と圧力損失の関係
Relation between Viscosity and Pump Pressure Loss

Table6 ビンガム流量比の算定結果
Calculation Result of Bingham Ratio

調査	W/C (%)	C/W	吐出量 (m³/h)	圧力損失 (kPa/m)	Q _B (m³/h)	R _b (%)
M50	35.6	2.81	30.0	18.2	9.6	32
M60	31.7	3.15	30.0	21.7	11.8	39
M80	25.5	3.92	30.0	40.7	15.7	52
Z80	25.0	4.00	30.0	24.8	11.6	39
Z100	20.0	5.00	30.0	40.1	11.8	39
Z120	17.0	5.88	30.0	68.2	11.5	38

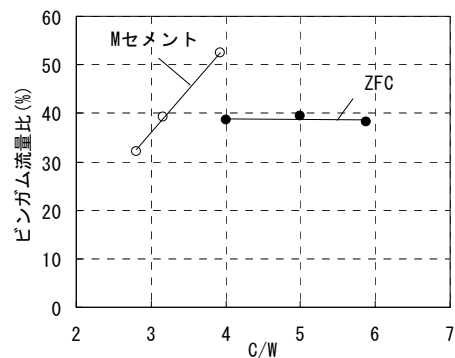


Fig. 11 セメント水比とビンガム流量比
Relation between C/W and Bingham Ratio

- 5) 小門 武, 他: スランブフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究, 土木学会論文集 V, 578巻, V-37号, p. p. 19-29, 1997
- 6) 谷川恭雄, 他: セメント系粘性材料のオート試験に関するレオロジー的考察, 日本コンクリート工学協会, セメント系充填材に関するシンポジウム論文集, p. p. 1-6, 1992
- 7) 和美廣喜, 他: 高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究: 日本建築学会構造系論文集, No. 466, p. p. 11-20, 1994