

論文 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

神代泰道^{*1}・一瀬賢一^{*2}・都築正則^{*3}

要旨：Fc=50 から 120N/mm² の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ず，静弾性係数は若干低下した。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，ポンプ圧送性の改善に効果があることが分かった。

キーワード：高強度コンクリート，ポンプ圧送性，圧力損失，シリカフューム

1. はじめに

近年，高強度コンクリートの普及により，現場において高強度コンクリートをポンプで圧送する機会が多くなってきた。高強度コンクリートは通常強度のコンクリートに比べて，圧力損失（配管 1 m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，ポンプ圧送性の確認が必要となる。特に，Fc=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¹⁾はあるが，極めて少ないのが現状である。今回，中庸熱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，Fc=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。

2. 実験概要

2.1 実施概要

ポンプ圧送実験は，Fc=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い，吐出量はそれぞれ 4 水準とした。実施時期

は，圧送条件として厳しくなる夏期とした。

2.2 コンクリートの使用材料及び調合

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，中庸熱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²⁾を事前に混入した中庸熱セメントベースのプレミックスセメント(ZFC)を用いた。使用材料を表 - 1 に，コンクリートの調合を表 - 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り混ぜ時間を長くした。

表 - 1 コンクリートの使用材料

分 類	記号	概 要
セメント (C)	M	中庸熱セメント，密度 3.21g /cm ³
	ZFC	ジルコニア起源シリカフューム混入セメント 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)，ポリカルボキ酸系
	SP2	高性能減水剤(S 社製)，ポリカルボキ酸系

*1 (株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ 副主査 工博 (正会員)

*2 同 グループ長 工博 (正会員)

*3 同 研究員 工修 (正会員)

2.3 圧送条件

配管図を図 - 1 に示す。配管は5 インチ管を用い、配管長は110mとした。配管種類は、ポンプ車の根元から60mまでをZX配管、80mまでを高圧(H)配管、それ以降を中圧(M)配管および一般(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。ポンプ車の諸元を表 - 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、標準モード(最大吐出圧15MPa)で実施した。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

試験項目を表 - 4 に示す。荷卸しおよ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、スランプフロー、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、圧送管には図 - 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。

表 - 2 コンクリートの調査

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

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

M80: スランプフロー 65 ± 7.5cm, 空気量 3.0 ± 1.5%

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

表 - 3 ポンプ車諸元

圧送モード	最大吐出圧(MPa)	最大吐出量(m ³ /h)	コンクリートシリンダ			シリンダ比
			直径(mm)	長さ(mm)	吐出量(m ³)	
標準	15	68	200	2100	0.066	0.438

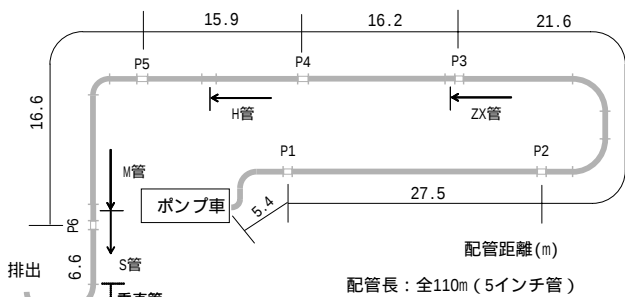


図 - 1 配管図

表 - 4 試験項目

項目	内容
圧送前後のコンクリート	スランプフロー, 空気量
	Oロート流下試験, コンクリート温度
管内圧力	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)
	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

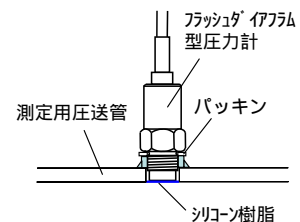


図 - 2 圧力計設置状況

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表 - 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プフロー、Oロート流下時間および空気量を比較して図 - 3 に示す。

中庸熱セメント(Mセメント)単体として用いたFc=50～80N/mm²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

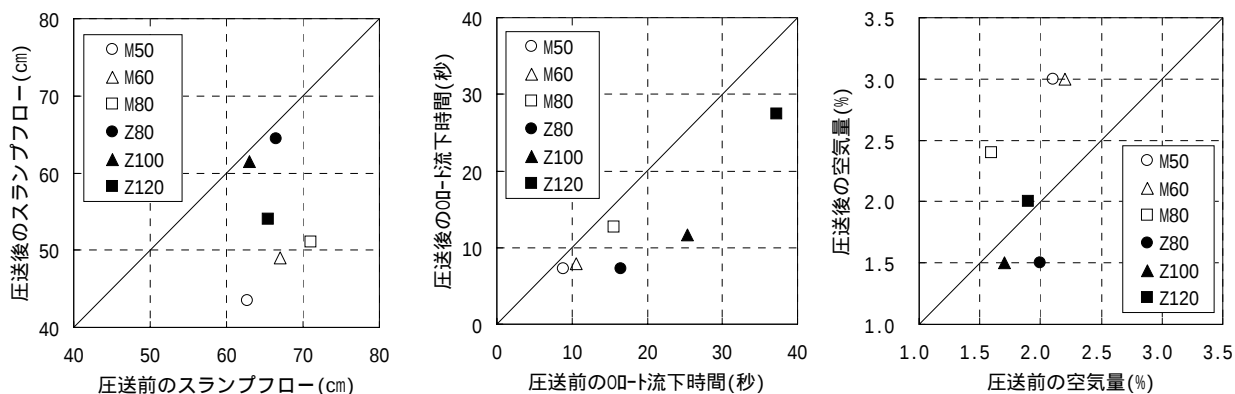


図 - 3 圧送前後のフレッシュ性状

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50m³/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える。一方，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。○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。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。

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圧縮強度および静弾性係数の試験結果を図-4及び図-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，圧縮強度には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。

表 - 5 フレッシュコンクリート試験結果

記号	測定場所	スランプフロー (cm)	ロート流下時間 (sec)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	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

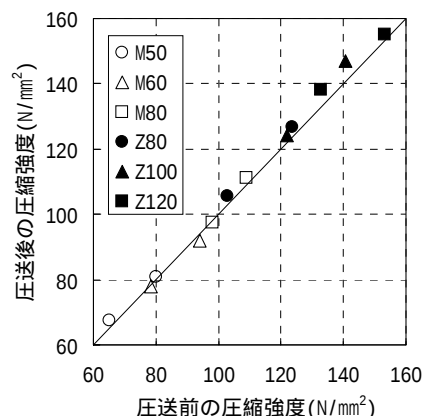


図 - 4 圧送前後の圧縮強度（材齢 28，91 日）

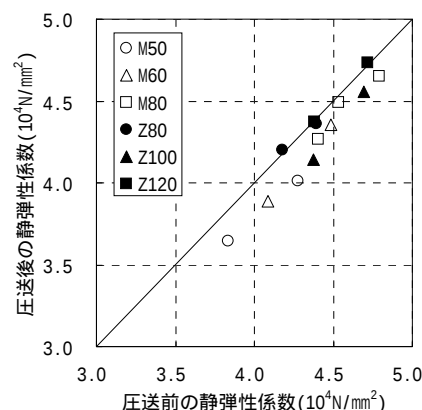


図 - 5 圧送前後の静弾性係数（材齢 28，91 日）

図 - 6 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。ZFCを用いたコンクリートの静弾性係数は、Mセメント単体としたコンクリートに比べて、圧縮強度に対する比率が小さめであった。また、圧送前後を比較すると、圧送後の方が圧縮強度に対する比率が小さくなる傾向であった。

3.3 管内圧力の測定結果

(1)測定波形

圧力の測定波形の一例を図 - 7 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、表 - 3 に示したコンクリートシリンダ容積に容積効率(これ

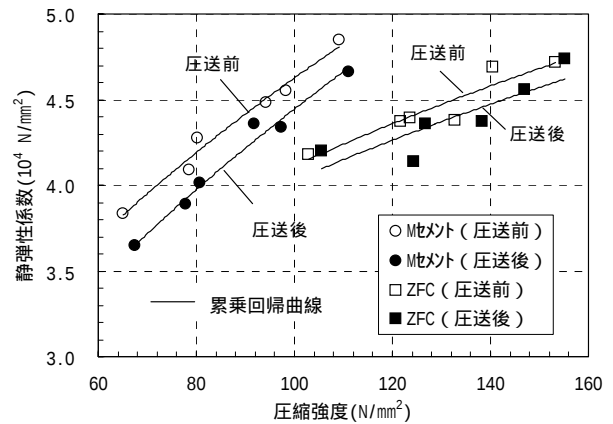


図 - 6 圧縮強度と静弾性係数の関係

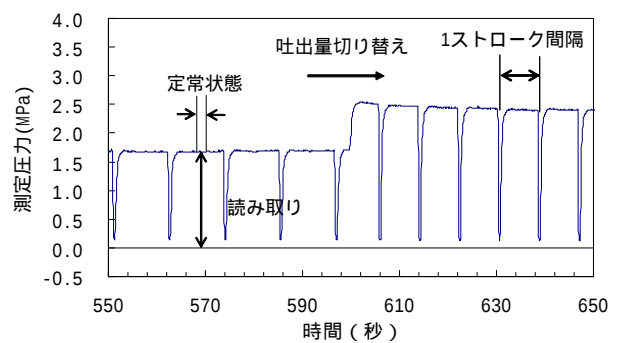


図 - 7 圧力波形の一例(Z120)

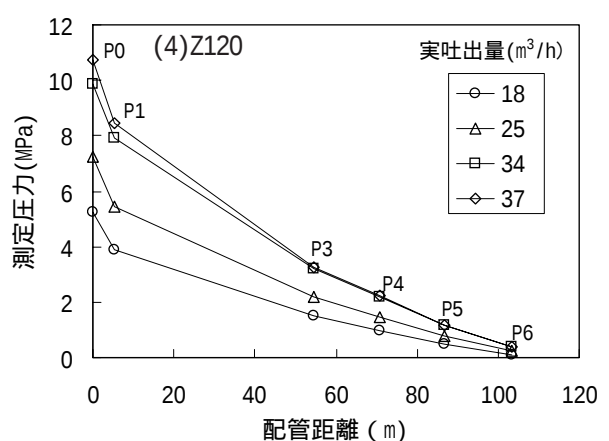
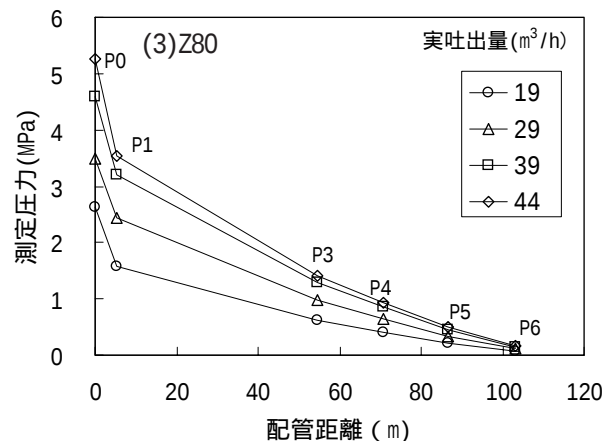
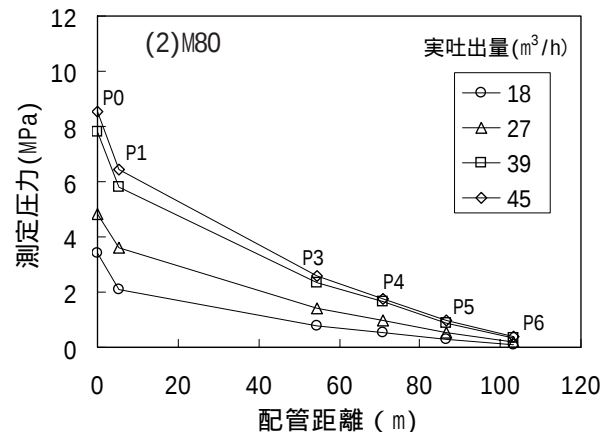
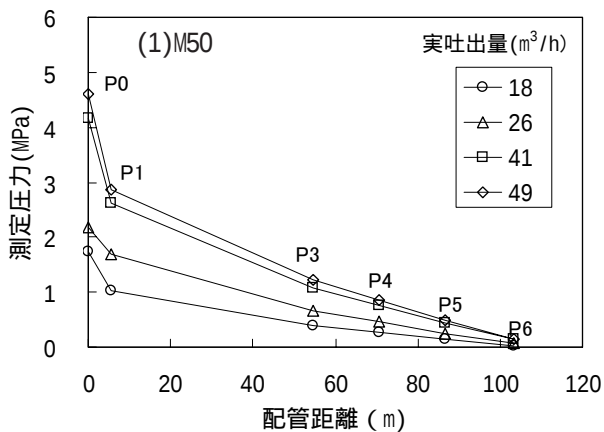


図 - 8 管内圧力測定結果

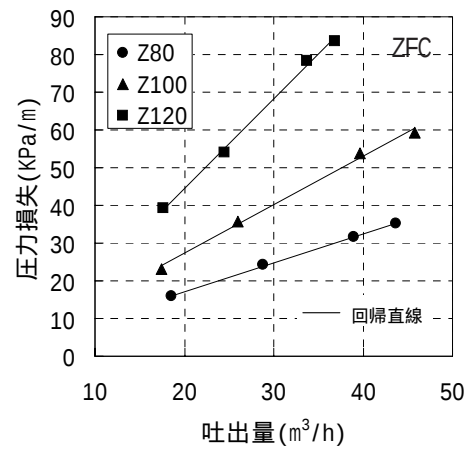
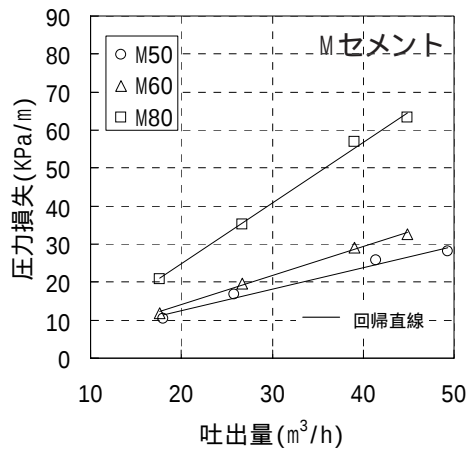


図 - 9 吐出量と圧力損失の関係

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, 表 - 3 に示したシリンダ比 (0.438) を乗じて算定した。

(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, M50, M80, Z80 及び Z120 の場合を図 - 8 に示す。配管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) 圧力損失

各コンクリートの圧力損失と吐出量の関係を図 - 9 に示す。全てのコンクリートで吐出量に対して圧力損失は直線的に大きくなり, その傾向は, 水セメント比の小さいコンクリートほど吐出量に対する圧力損失の増加の割合が大きくなる傾向であった。Fc=80N/mm² に対応する M80 と Z80 について比較すると, M80 に対する Z80 の圧力損失は, 吐出量 20m³/h で 30%, 吐出量 30m³/h で 40% 程度の低減がみられ, 吐出量が多いほど, 低減効果は大きくなった。これは ZFC を用いた場合, ポンプ圧送後のスラン

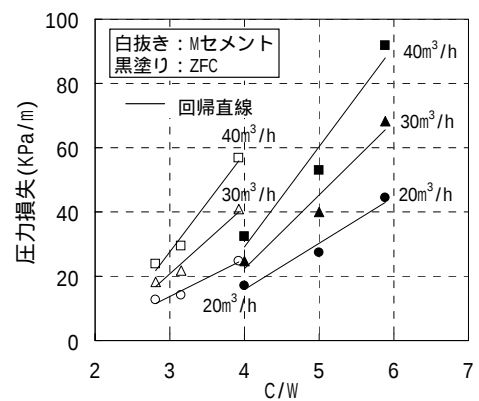


図 - 10 C/W と圧力損失の関係

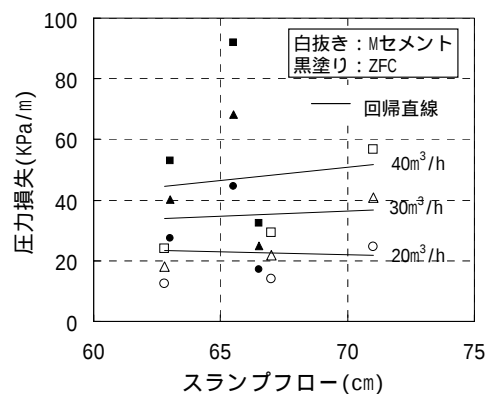


図 - 11 スランプフローと圧力損失の関係

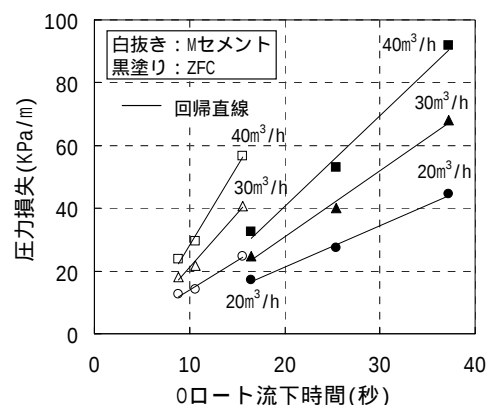


図 - 12 オロート流下時間と圧力損失の関係

短いと考えられる。このようにジルコニア起源シリカフュームを混入することによりポンプ圧送性が改善されることを確認した。

3.4 圧力損失に影響を及ぼす要因

図 - 9 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。影響要因はセメント水比(C/W)、Oロート流下時間およびスランプフローとした。スランプフローとOロート流下時間は圧送前のものとした。圧力損失とC/Wの関係を図 - 10 に示す。コンクリートのC/Wが大きくなるほど圧力損失は増加し、吐出量が大きいほどその傾向は強くなった。また、セメント種類で比較すると、Mセメントを用いたW/C=25%及び30%の高強度コンクリートの圧力損失は、ZFCを用いたW/C=20%及び25%の高強度コンクリートの圧力損失に相当するようであった。スランプフローと圧力損失の関係を図 - 11 に示す。スランプフローが大きいほど、圧力損失は小さくなると考えられるが、今回の範囲(フロー61～71cm)においては、スランプフローの大きさが圧力損失に及ぼす影響は認められなかった。Oロート流下時間と圧力損失の関係を図 - 12 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³⁾とされるが、Oロート流下時間についてもかなり相関が高いことを確認した。これはOロート流下時間が主としてコンクリートの塑性粘度を評価しているためであり、今後、比較的簡便なOロート流下試験によってポンプ圧送性の評価ができる可能性が得られた。

4. まとめ

中庸熱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プフローは低下するものの、Oロ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) Oロート流下時間と圧力損失はかなり相関が高いことを確認した。
- (5) ジルコニア起源シリカフュ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。

参考文献

- 1) 鳴瀬浩康, 藤井和俊, 石中正人ほか: 150N/mm^2 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
- 2) 神代泰道, 一瀬賢一, 都築正則, 齋藤賢: 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
- 3) 和美廣喜, 桜本文敏, 柳田克巳: 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