

[1035] 高流動コンクリートの高所圧送実験

佐原 晴也^{*1}、竹下 治之^{*2}、庄司 芳之^{*3}、尾上 修^{*4}

1. はじめに

高流動コンクリートの実施工例が増えているが、多くの場合コンクリートポンプを用いて施工されており、ポンプ圧送性に関する報告もいくつかみられるようになった[1]、[2]、[3]。

しかし、これらの報告はブーム車や水平配管による施工であり、高所圧送の報告例はまだ少ないようである。今後、高所垂直圧送の必要性も高くなり、より圧送が困難な高層RC建築物への高強度・高流動コンクリートの適用も予想されているが、これらの圧送計画に反映できるデータの蓄積が必要と考えられる。

ここでは、著者らが早くから研究を続けている、増粘剤と高性能(AE)減水剤を添加した高流動コンクリート[4]、[5]（以下、SFコンクリートと称す）を、コンクリートポンプ車で約75m垂直圧送し、その高所圧送性を検討した実験結果を報告する。

2. 実験概要

2. 1 実験内容

圧送実験は高層RC建築物の25階施工時に実験を行ったものであり、①SFコンクリートの高所圧送の可否、②圧送の難易（圧送圧力）、③圧送前後の品質変化、などを把握することを目的として実施した。表-1に実験計画を示すが、SFコンクリートと比較するために、施工階の使用コンクリートである呼び強度330kgf/cm²の高強度コンクリート（記号F330）と、これより高強度の呼び強度420kgf/cm²の高強度コンクリート（記号F420）の圧送性も同時に測定した。なお、圧送量は各実験条件ともにアジャーティ車1台分（5m³/台）とした。

2. 2 使用材料およびコンクリートの配合

表-2に使用材料を、表-3にコンクリートの配合を示す。SFコンクリートの水セメント比はF330と同じにし、室内およ

表-1 実験計画

実験記号	コンクリートの種類	目標吐出量 (m ³ /h)	圧送量 (m ³)
F330-30	高強度コンクリート 1	30	5
F330-50		50	5
F420-30	高強度コンクリート 2	30	5
F420-50		50	5
SF-30	SFコンクリート	30	5
SF-50		50	5

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント、比重 3.15
細骨材	町屋川産砂と多度産山砂の混合、比重 2.59、FM 2.85
粗骨材	木曽川産砂利と南濃産碎石の混合、最大寸法 25mm、比重 2.64
高性能AE減水剤	SP ₁ :ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体 SP ₂ :変性リグニン、アルキルアリルスルфон酸および活性持続ポリマーの複合体
増粘剤	セルロース系水溶性高分子化合物

*1 日本国土開発(株)技術研究所 コンクリート研究室主任研究員(正会員)

*2 日本国土開発(株)技術研究所 コンクリート研究室長、工博(正会員)

*3 日本国土開発(株)技術研究所 コンクリート研究室、工修(正会員)

*4 日本国土開発(株)建築本部課長

び実機の試験練りを行って配合を決定した。

2.3 コンクリートの製造および運搬

S F コンクリートおよび2種類の高強度コンクリートとともに、レデーミクストコンクリート工場の二軸型強制ミキサ（容量 1.5m³）

を用いて製造した。S F コンクリートの1バッチの製造量は1.25m³とし、練り混ぜ時間は120秒とした。コンクリートの運搬はアジテータ車で行い、運搬時間は約40分であった。

2.4 コンクリートポンプ車の仕様および配管

使用したコンクリートポンプ車は本工事で通常使用している機種であり、その仕様を表-4に示す。

また、実験時の配管条件を図-1に示す。

2.5 測定項目

(1) コンクリートの品質

フレッシュコンクリートについては、圧送前後のスランプおよびスランプフロー、空気量、コンクリート温度を測定した。また、SF-50の圧送時には、著者らが提案したボックス試験[5]を圧送前後に実施し、ワーカビリチーを評価した。各試験の試料は、圧送前後でほぼ同一部位のコンクリートが採取できるように時間をずらして採取した。硬化コンクリートについては、圧送前後の材令28日圧縮強度（現場水中養生）を測定した。

(2) 圧送時の管内圧力および吐出量

図-1のP₁、P₂、P₃の3点にひずみゲージ式圧力変換器を取り付けて、圧送時の管内圧力を測定した。また、アジテータ車1台分のコンクリートの圧送に要する時間と総ストローク数を測定し、理論吐出量、実吐出量および容積効率を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 S F コンクリートの高所圧送

S F コンクリートの圧送開始当初、ポンプ車のホッパー内でS F コンクリートとF420が混合されてコンクリートの流動性が大きく低下（セルロース系増粘剤とF420に使用した高性能AE減水剤の相性によるコンクリートの凝集）し、圧送圧力が非常に高くなったり現象がみられたが、それ以外はS F コンクリート、F330、F420ともに閉塞や異常な圧力上昇を生ずることなく、ほぼ目標

表-3 コンクリートの配合

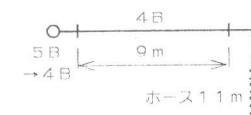
コンクリートの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能AE減水剤 (C × %)	増粘剤 (kg/m ³)	
			水*	セメント	細骨材	粗骨材			
S F コンクリート	45.5	51.8	175	385	875	832	2.5**	0.4	
高強度 コンクリート	1	45.5	47.4	169	372	826	935	1.4***	—
	2	36.5	43.5	172	471	720	954	1.3***	—

*: 高性能AE減水剤の使用量を含む、**: SP₁、***: SP₂

表-4 コンクリートポンプの仕様

型 式	複動ピストン式
最大吐出量	70m ³ /h (高圧圧送時)
理論吐出圧力	80kgf/cm ² (高圧圧送時)
シリカターサイズ*	Φ 205 × 1650mm
ホッパー容量	500ℓ

【施工階配管①: F330、F420圧送時】 (90°、R=0.5m)



【施工階配管②: S F コンクリート圧送時】

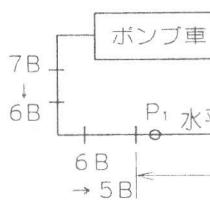


図-1 配管および管内圧力測定位置

表-5 圧送前後のコンクリートの試験結果

実験記号	圧送前						圧送後							
	スラブ*	スラブフロー	空気量	コンクリート温度	ボックス試験		圧縮強度*	スラブ*	スラブフロー	空気量	コンクリート温度	ボックス試験		
					段差	充填時間						(cm)	(秒)	(kgf/cm²)
F330-30	21.5	39.0×37.0	5.3	21.5	-	-	366 (3.3)	19.0	33.0×29.5	4.6	22.5	-	-	350 (8.1)
F330-50	21.0	35.5×35.0	4.9	22.0	-	-	396 (1.9)	17.5	30.0×25.0	3.7	22.5	-	-	388 (5.7)
F420-30	21.5	37.0×36.0	5.4	22.5	-	-	494 (5.6)	18.0	31.0×30.0	4.7	22.5	-	-	434 (3.7)
F420-50	21.5	36.0×36.0	5.3	23.0	-	-	412 (6.0)	18.0	30.0×29.0	4.7	24.0	-	-	476 (9.2)
SF-30	-	66.5×66.0	3.1	23.0	-	-	430 (3.3)	-	65.0×64.0	4.2	23.5	-	-	442 (5.3)
SF-50	-	67.0×65.5	6.0	23.0	2.0	a:5 b:9	329 (1.3)	-	66.5×66.0	6.6	23.5	1.5	a:3 b:5	333 (2.1)

* () 内は供試体3本の圧縮強度の変動係数(%)

の吐出量で圧送することができた。これにより、通常のコンクリートポンプ車を用いて、高さ75m程度までSFコンクリートの垂直圧送が可能なことが確認された。

3.2 圧送によるコンクリートの品質変化

表-5に、圧送前後のフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの試験結果を示す。

3.2.1 スランプおよびスランプフロー

F330、F420の2種類の高強度コンクリートは、圧送によりスランプおよびスランプフローとともに低下し、吐出量が大きいほど低下量が大きくなる傾向にあった。スランプおよびスランプフローの低下量はそれぞれ2.5~3.5cm、6~8cmであり、高強度コンクリートを垂直圧送した既往の研究[6]、[7]、[8]に比べて低下量が大きい。これは本実験における垂直圧送高さが大きいためと考えられる。

一方、SFコンクリートの圧送によるスランプフローの変化は、吐出量に関わらず非常に小さいものであった。高流動コンクリートの圧送前後の品質を検討した既往の研究[1]、[2]、[3]、[9]では、圧送によるスランプフローの低下が大きいとの報告が多く、傾向が異なる。

圧送によるスランプフロー低下の原因の一つとして空気量の減少が考えられる。事実、スランプフローの低下が大きい圧送例[2]、[9]では空気量の減少も大きく、空気量の減少がなかった本実験ではスランプフローの低下が小さかったことも考えられる。しかし、空気量の減少がない場合でも大きなスランプフローの低下が生じた報告もみられる[3]、[9]。

スランプフロー低下の他の原因として、管内における圧送中の水やペーストの分離が考えられる。圧送中のコンクリートでは、管壁方向に水やペーストが移動(分離)することによって管壁との間に潤滑層が形成され、圧送抵抗が低下するとされている[10]。したがって、圧送中の水やペーストの分離は圧送抵抗の軽減に必要な性質であるが、スランプフローの低下原因にもなると考えられる。すなわち、管内で一度コンクリートから分離した水やペーストは、排出後に練り返しても必ずしも圧送前と同じように流動性に寄与するとは限らず、筒先から採取した試料のスランプフローの低下となって現われると考えられる。このように、水やペーストの分離をスランプフローの低下原因の一つと考えると、SFコンクリートのように増粘剤で水の粘性を大きくしたコンクリートでは、加圧条件下での水やペーストの分離が生じにくくなり[11]、結果として圧送によるスランプフローの低下は小さくなるものと考えられる。既往の研究[9]で同じ条件で圧送した場合に、増粘剤系の高流動コンクリートのスランプフローの低下量が、多粉体系の高流動コンクリートのそれに比べて小さいことにも上述のことが示されていると思われる。また、水中不

離性コンクリートが圧送による流動性の低下が小さい[12]ことからも同様なことが伺える。

このほかに、高圧下における骨材の圧力吸水もスランプフロー低下の原因になり得るが、水の粘性が大きい場合には吸水される量が少なくなると考えられる。しかし、増粘剤系の高流動コンクリートでも圧送によるスランプフローの低下が大きい報告[3]もあり、使用材料、配合、気象条件、圧送条件などにより品質変化の度合は異なると考えられる。

3. 2. 2 空気量

F330、F420の空気量は吐出量に関わらず圧送後には0.6~1.2%低下したが、SFコンクリートの空気量は逆に0.6~1.1%増加した。圧送による空気量の増加は粘性が大きいコンクリートにみられる傾向があるが[6]、[13]、その原因是ポンプ車のホッパー内の攪拌時の空気の巻き込みや高性能AE減水剤の性質などが考えられる。

3. 2. 3 圧縮強度

圧送による圧縮強度の変化には、既往の研究[13]と同様に空気量の変化との相関はみられなかったが、圧送後の強度のばらつきが若干大きくなる傾向にあった。。また、圧送前後の圧縮強度の差は、SFコンクリートとF330は小さいが、F420ではやや大きくなかった。

なお、SF-50の圧縮強度はSF-30に比べてかなり小さい。これは空気量が3%程度異なることが原因の一つであるが、それによる強度低下は15%程度と考えられ、空気量以外に細骨材の表面水の変動などの影響もあると考えられる。

3. 3 圧送時の管内圧力と圧力損失

表-6に圧送圧力関係の測定結果の一覧を示す。

3. 3. 1 管内圧力と容積効率

図-2に測定位置と管内圧力の関係を示す。表-6および図-2から、いずれのコンクリートも吐出量が多いほど管内圧力は大きくなっていることが分かるが、吐出量40~50m³/hのSFコンクリート、F330、F420のP₁点の管内圧力は、それぞれ38、44、34.5kgf/cm²であり、ポンプ車の圧送能力を考えるとまだ十分な余力があった。従って、更に長距離の垂直圧送も可能と考えられる。

所要圧送時間と総ストローク数を測定して求めたポンプの容積効率は、F330とF420は平均で89%でありスランプ20cm程度のコンクリートの標準的な数値になっているが、SFコンクリートは平均84%でありスラン

表-6 圧送圧力測定結果

実験記号	理論吐出量 (m ³ /h)	実吐出量 (m ³ /h)	容積効率 (%)	管内圧力 (kgf/cm ²)			圧力損失 (kgf/cm ² /m)	
				P ₁	P ₂	P ₃	水平*	垂直
F330-30	35.8	30.8	86	29.7	28.5	7.0	0.100	0.299
F330-50	53.5	49.2	92	38.0	35.7	11.2	0.192	0.341
F420-30	35.4	31.9	90	37.0	34.8	9.4	0.183	0.354
F420-50	45.5	40.5	89	44.0	42.2	13.3	0.150	0.403
SF-30	35.3	30.3	86	32.1	30.5	6.9	0.133	0.329
SF-50	48.8	40.0	82	34.5	32.4	7.1	0.175	0.352

* 水平換算距離を12mとして計算

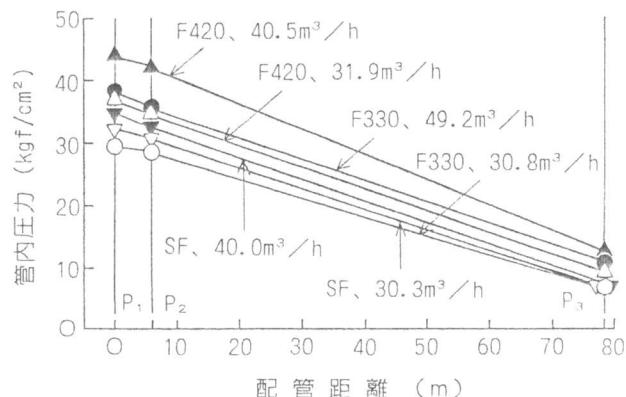


図-2 管内圧力と配管距離の関係

ブ12cm前後のコンクリートと同程度の効率となつた[14]。

3. 3. 2 圧力損失

図-3に実吐出量と圧力損失の関係を示す。F330、F420の水平管1m当りの管内圧力損失（水平圧力損失）は、コンクリートポンプ工法施工指針[14]に示されたスランプ21cmのコンクリートに比べて大きく、吐出量30m³/h前後の場合で前者が約1.5倍、後者が約2.5倍になっている。一方、上向き垂直管1m当りの管内圧力損失（垂直圧力損失）は、水平圧力損失の2～3倍になっているが、両者の差はコンクリートの単位体積重量よりも小さい結果が多い。高強度コンクリートのポンプ圧送に関する既往の研究では、本実験と同様の結果が得られている例[15]もあるが、著者らの別の実験[8]や、他の報告[7]、[16]では、垂直圧力損失は水平圧力損失にコンクリートの単位容積重量を加えた値よりも大きい結果が得られている。このような違いは配管条件や圧力測定方法の違いによると考えられるが、本実験ではポンプに近い高圧力がかかっている短い区間の圧力測定値から水平圧力損失を算出しているため、この圧力損失がやや大きいことも考えられる。

S Fコンクリートの水平圧力損失は、セメント量が同程度の高強度コンクリートのF330よりも約30%大きく、セメント量がこれより100kg/m³ほど多い高強度コンクリートのF420よりは約40%小さい。また、従来建築工事で使用してきた呼び強度210～270kgf/cm²程度の通常のコンクリートと比較すると、吐出量が30m³/h前後ではスランプ12cm程度のコンクリートと同程度かやや大きい水平圧力損失であるが、吐出量が40m³/hでは約30%、50m³/hでは約50%大きくなる傾向にある。一方、垂直圧力損失は水平圧力損失の2～2.5倍であり、水平圧力損失同様にF330よりも大きく、F420よりは小さい。

多粉体系の高流動コンクリートのポンプ圧送に関する既往の研究[1]では、吐出量が30m³前後の場合の圧力損失は、スランプ21cm程度の通常コンクリートと同等であり、吐出量が50m³/h前後ではスランプ12cm程度の通常コンクリートと同等の圧力損失になっている。本実験の結果と合わせて考えると、増粘剤系の高流動コンクリートは多粉体系の高流動コンクリートに比べて圧力損失が大きくなると言える。増粘剤系と多粉体系の2種類の高流動コンクリートの圧力損失を測定した研究[3]でも同様な結果が得られている。これは、増粘剤系の高流動コンクリートは多粉体系に比べて粘性が大きい（モルタルの塑性粘度が大きい[9]）ことが大きな原因と考えられるが、前述したように、増粘剤系の高流動コンクリートでは管壁方向への水やペーストの移動（分離）が起こりにくくことも一因と考えられる。

3. 4 圧送性の良いS Fコンクリート

ポンプ圧送によるスランプフローの低下を小さくするためには、水の粘性を大きくし圧送中の水分移動を起こりにくくした方が良いと考えられる。一方で、圧送を容易にする潤滑層を形成するためには適度な脱水性が必要であり、水の粘性が大きすぎて脱水速度が遅くなると圧送性が低下する。従って、S Fコンクリートの粘性としては、スランプフローの低下が生じない程度に水やペーストが移動しにくく、かつ、潤滑層も形成し易い適度な粘性のものが圧送性が良いと言え

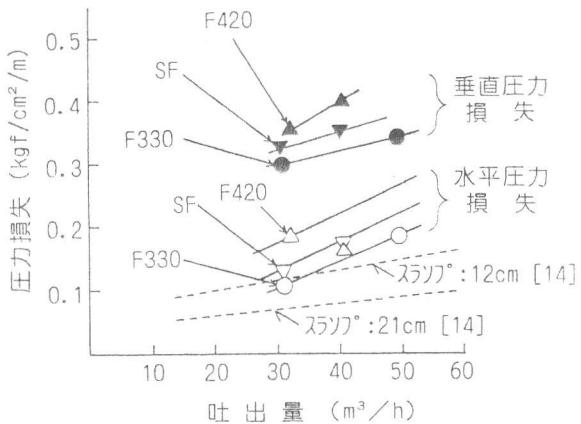


図-3 実吐出量と圧力損失の関係

る。本実験ではS Fコンクリートのレオロジー定数等は測定していないが、表-5に示したボックス試験の充填時間（ある高さまで到達する時間）は、S Fコンクリートの粘性の大小を示す指標であり、今後ポンプ圧送性を検討する際の参考になるとを考えている。なお、ポンプ圧送性を検討する際の“粘性”は、単位水量と増粘剤量に関わる水の粘性を考えるのか、あるいは結合材量や使用材料の品質も含めたペーストの粘性で考えるのかなどについては、今後の研究課題である。

4.まとめ

S Fコンクリートの高所圧送性を実験的に検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 通常のコンクリートポンプ車を用いて、 $30\sim50\text{m}^3/\text{h}$ の一般的な吐出量で約75mの垂直圧送が可能である。また、コンクリートポンプ車の能力には余力があり、更に長距離の垂直圧送が可能と考えられる。
- (2) 圧送によるスランプフローの低下は非常に小さい。この一因として、増粘剤の効果により水やペーストの粘性が増大し、圧送時にこれらの分離が起こりにくくなることが考えられる。また、空気量は圧送後に幾分増加する傾向にあるが、圧縮強度の圧送前後の変化は小さい。
- (3) 水平圧力損失は、セメント量が同程度でスランプが21cm程度の高強度コンクリート（呼び強度 330kgf/cm^2 ）よりは約30%大きいが、セメント量がこれより 100kg/m^3 程度多い高強度コンクリート（呼び強度 420kgf/cm^2 ）よりは約40%小さい。また、呼び強度 $210\sim270\text{kgf/cm}^2$ 程度の通常のコンクリートと比較すると、吐出量 $30\text{m}^3/\text{h}$ 前後ではスランプ12cm程度のコンクリートと同程度の圧力損失であるが、吐出量 $40\sim50\text{m}^3/\text{h}$ では30~50%大きい。また、垂直圧力損失は水平圧力損失の2~2.5倍である。

【参考文献】

- [1] 坂本 淳ほか：超流動コンクリートのポンプ圧送性、土木学会第46回年次学術講演会概要集、第5部、pp. 624~625、1991.9
- [2] 井手 一雄ほか：過密配筋されたシールド二次覆工における高流動コンクリートの適用、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 195~200、1993.6
- [3] 川端 康夫ほか：高流動コンクリートの基礎的性状に関する研究（その3 ポンプ圧送性について）、土木学会第48回年次学術講演会概要集、第5部、pp. 162~163、1993.9
- [4] 竹下 治之ほか：締固め不要な高流動コンクリートに関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、Vol. 1、No. 1、pp. 143~154、1990.1
- [5] 佐原 晴也ほか：高流動コンクリートのワカビリチー評価試験方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 1、pp. 137~142、1991.6
- [6] 庄川 選男ほか：プラント添加による高強度流動化コンクリートの検討（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 51~52、1986.8
- [7] 黒羽 健嗣ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送による品質変化および管内圧力の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 745~746、1987.10
- [8] 尾上 修ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 257~258、1989.10
- [9] 友澤 史紀ほか：各種高流動コンクリートの特性評価及び実大模型打設実験（その1~その8）、pp. 1145~1160、1993.9
- [10] 田沢 栄一：ポンプ圧送技術の現状と問題点、コンクリート工学、Vol. 21、No. 11、pp. 13~22、1983.11
- [11] 神田 亨ほか：セルロース系粘稠剤がモルタルの加圧脱水性状に及ぼす影響、土木学会第42回年次学術講演会概要集、第5部、pp. 586~587、1987.9
- [12] 新納 格ほか：アクリル系特殊水中コンクリートのポンプ圧送特性に関する研究、土木学会第42回年次学術講演会概要集、第5部、pp. 638~639、1987.9
- [13] 毛見 虎雄ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究（その1~その6）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 561~572、1990.10
- [14] 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説、1979
- [15] 森 浩之ほか：高強度コンクリート（Fc420）の高所圧送（地上 38m）に関する施工実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1103~1104、1993.9
- [16] 和美 広喜ほか：スランプロス低減型高性能減水剤を用いた高強度コンクリートのポンプ圧送性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 759~760、1986.8