高流動コンクリートの実大 部材へのポンプ圧送に関する 実験研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON PUMPING HIGH FLUIDITY CONCRETE WITH REAL SIZE MODEL

明石 峰子 ———*1
毛見 虎雄 ———*2
藤井 和俊 ———*3
小長光公和 ———*4

Mineko AKASI
Torao KEMI
Kazutoshi FUJII
Kimikazu KONAGAMITSU

In the field of building materials, high fluidity concrete has been developed. High fluidity concrete consists of various materials and many combinations of these materials are possible, but the consistency and workability of these concrete is not clear yet. So, in this paper an investigation was made on the change of concrete properties through pumping, fluidity and pumpability, by placing four kinds of concrete into real-size wall and column mould using pumping method.

キーワード：
高流動コンクリート、ポンプ圧送性、コンクリートの品質変動、圧力損失、実大試験体

Keywords：
high fluidity concrete, pumpability, variation in quality of concrete, pressure-loss, real-size model

1 はじめに

近年、構造物の大規模化や要求性能の多様化に伴い、建築材料の技術革新は目覚ましいものがある。コンクリートの分野においても、高強度コンクリートや高流動コンクリート等の高性能なコンクリートが盛んに開発されている。

高強度コンクリートについては実構造物も多くあり、技術的にも一定レベルまでは確立されつつある。しかし、高流動コンクリートについては大規模な土木構造物には実績が見られるものの、建築構造物の上部躯体への適用例は少ない。

一般的に高流動コンクリートは粉体タイプと分離低減剤タイプに分類できる。通常の調合にも適用できる高流動コンクリート^{1)~3)}もあるが、粉体量が多く W/C を小さくする方法での調合となるものが多いため、施工に際してのポンプ圧送性やコンクリートの流動性状などの品質についても必ずしも明確ではない。

本実験研究では3種類の高流動コンクリートおよび比較検討用の高強度コンクリートを用いて、実大規模の壁・柱試験体にポンプ圧送によって打設を行い、圧送前後のコンクリート品質の変動・ポンプ圧送性・流動性状・構造体コンクリートの品質について検証した。

本報告は既に報告⁴⁾したものに加筆検討して取りまとめたものである。

2 最近の高流動コンクリートに関する研究と本実験の関係

高流動コンクリートに関する研究は、コンクリートの高流動化の手法やフレッシュコンクリートの特性およびその評価試験方法に関するものが中心であるが、最近では施工性に関する実験や実構造物への適用例も報告されている。また、CFT(鋼管コンクリート構造)の柱への圧入方法も試みられている^{5),6)}。しかし、高流動コンクリートの調合・製造及び施工上の指針を確立するにはこれら実施工の更なる検証が必要となる。

一般にコンクリート工事においては、ポンプ圧送による施工が多く行われている。高流動コンクリートは高い流動性をもち、それに相反する分離抵抗性を粉体量の増加や分離低減剤に依存する場合が多い。そのため通常のコンクリートに比べて粘性が増大し、圧送抵抗が大きくなり、圧送による品質の変動が予測される。今後高流動コンクリートが実施工に適用されるためには、ポンプ圧送性およびコンクリートの品質変動等の施工性の評価が重要な意味をもつ。これら施工性の評価には、ポンプ圧送時の流動特性とフレッシュコンクリートのレオロジー特性値の関係についての研究^{7),8)}等がある。また、圧送実験や施工実験あるいは実施工で得られた高流動コンクリートの施工性に関する報告^{9)~19)}もされている。

図1~図4は1993, 94年度の学会、コンクリート工学協会等の高流動・高強度コンクリートのポンプ圧送実験に関する論文・報

*1 三菱建設(株)技術本部建築技術部

*2 足利工業大学工学部建築学科 工博

*3 三菱建設(株)技術本部技術研究所

*4 三菱建設(株)技術本部建築技術部

*1 Building and Structural Engineering Department, Mitsubishi Construction

*2 Department of Architecture, Faculty of Engineering, Ashigkaga Institute of Technology, Dr. Eng

*3 Technical Research Institute, Mitsubishi Construction

*4 Building and Structural Engineering Department, Mitsubishi Construction

図1 圧送前後のフローの変動

図2 圧送前後の空気量の変動

図3 圧送前後の圧縮強度の変動

図4 吐出量と圧力損失の関係

告^{9)~19)}のデータを取りまとめたものである。スランプフローの変動は圧送により変化のないものもあるが概して低下し、スランプフローが小さい程低下が著しく、網掛けの範囲で変動する傾向が見られる。また、高流動コンクリートは普通コンクリート²⁰⁾に比べ吐出量の増加に伴う圧力損失の増加割合が大きくなっている。しかし、これらの調査は様々であり、実験条件により差異があるため、ポンプ圧送性やコンクリートの品質変動等を評価する要因については必ずしも明らかではない。

本実験では高流動コンクリートの施工性に関して実施工に反映できるデータの蓄積を目的とし、3種類のセメントを用いて比較的粉体量の多いW/Bの小さいコンクリートの圧送実験を行った。これらのコンクリートを実大規模の壁・柱試験体へポンプ圧送により打設し、圧送前後のコンクリートの品質変動、ポンプ圧送性および構造体コンクリートの品質等について検討した。

3 実験概要

3.1 実験計画

本実験では高ビーライト系ポルトランドセメントを使用した低発熱型の高流動コンクリート(LHC)と、三成分系セメントに高性能AE減水剤と高分子天然多糖類の分離低減剤を使用した高流動コンクリート(BPC)、シリカフェーム混合セメントを使用した高流動コンクリート(SFC)および比較検討のための高強度コンクリート(HSC、 $F_c=42\text{ N/mm}^2$)の4種類のコンクリートを圧送した。

表1 使用材料

材料	コンクリート種類				内 容
	LHC	BPC	SFC	HSC	
セメント	○		○		普通ポルトランドセメント (比重:3.16 比表面積:3250cm ² /g)
	○				高ビーライト系ポルトランドセメント (比重:3.25 比表面積:3140cm ² /g)
			○		シリカフェーム混合セメント (比重:3.01 比表面積:4000cm ² /g)
粗骨材	○	○	○	○	岡山産石灰岩砕石 (表乾比重:2.71 吸水率:0.99% 実積率:60.1%)
	○	○	○	○	岡山産石灰岩砕砂 (表乾比重:2.66 吸水率:1.18% F.M.:3.21)
*細骨材	○	○	○	○	香取郡産山砂 (表乾比重:2.58 吸水率:1.56% F.M.:1.95)
		○			高炉スラグ粉末(比重:2.92 比表面積:4350cm ² /g)
混和材		○			フライアッシュ(比重:2.30 比表面積:4030cm ² /g)
	○	○	○	○	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
混和剤		○			分離低減剤(高分子天然多糖類)
		○			

*細骨材混合比 砕砂:山砂=50:50 (LHC, BPC, SFC), 62:38 (HSC)

表2 調査

コンクリート種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						目標値
			セメント	水	高炉スラグ	フライアッシュ	粗骨材	細骨材	
LHC	30.0	50.8	550	165	—	—	843	846	650
BPC	33.0	49.2	200	165	200	100	796	846	
SFC	22.0	44.2	705	155	—	—	685	894	
HSC	36.0	49.9	472	170	—	—	855	880	*18cm

注) 骨材質量は表乾状態とする

*HSCはスラング

3.2 使用材料および調査

実験に使用した材料を表1に、4種類のコンクリートの調査を表2に示す。調査は目標とした値が得られるように室内予備実験を行い決定した。

3.3 配管条件および打設方法

図5に配管状況および配管内圧力測定位置を示す。輸送管径は5B(125A)とした。配管長は水平圧送約100m(水平換算約120m)、垂直圧送2.5mの条件と、水平圧送約73m(水平換算約97m)、垂直圧送2.5mの条件の2種類とし、二日に分けて実験を行った。打設時の外気温は30~35℃であった。

各コンクリートは実機プラントで製造後、コンクリート運搬車で実験場所まで約30分運搬して実験に用いた。打設はポンプ圧送により行い、壁試験体は4および5層に分けて打設し、柱試験体は吐出量を30、40、50m³/hと変化させて打設した。その際、高強度コンクリート(HSC)以外は締固めは行わなかった。

3.4 実大試験体概要

図6に実大試験体の概要を示す。壁試験体は長さ15m、高さ1.5mで、5m間隔で柱型(600×600mm)をもつものとし、200mmの壁厚とした。コンクリートの投入口は壁端部の高さ3mの柱型とし、壁中央部約5mには透光性型枠を用いた。配筋は図6のとおりとし、投入口の柱型は上部に梁を想定した配筋とした。ポンプ圧送時の管内圧力測定には900×900mm、高さ2.2mの柱試験体を用いた。

3.5 測定項目および測定方法

測定項目を表3に示す。

(1) 圧送前後のコンクリート品質の変動

コンクリートのフレッシュ性状についてはポンプ圧送前後においてスランプフロー、スランプフローが500mmまで流動する時間(以下フロー時間)および空気量の測定を行った。また、ポンプ圧送前後に供試体を採取し、標準水中養生、現場水中養生を行ったもの圧縮強度を測定した。

図5 配管状況および圧力測定位置

表3 測定項目

試験項目	コンクリート種類	コンクリート種類				備考
		LHC	BPC	SFC	HSC	
コンクリートの品質	スランプフロー時間 空気量 (HSCはスランプ) コンクリート温度 圧縮強度	○	○	○	○	圧送前後に試料採取
ポンプ圧送性	ポンプ主油圧 管内圧力	○	○	○	○	柱試験体に打設30~50m³/h
流動性状	流動勾配	○	○	-	-	壁試験体に打設
構造体の品質	圧縮強度 静弾性係数 粗骨材面積率	○	○	-	-	壁試験体からの37供試体による

(2) ポンプ圧送性

ポンプ圧送時のポンプ主油圧および管内圧力を測定した。管内圧力は配管に設置した計測管を介して圧力波形として記録し、これからストローク数・所要時間を読み取り、実吐出量・理論吐出量・容積効率を算出した。

(3) 流動状況

壁試験体は1~3層を投入口より打設し天端まで打ち上げ、その後筒先を移動させ4および5層を打ち込んだ。打設時の流動状況は側面の透光性型枠および天端から観察し、各層の流動停止時に打設高さを測定した。

(4) 構造体コンクリートの品質

壁試験体からコア供試体を採取し、材齢28日の圧縮強度および静弾性係数を測定した。また、コア供試体断面の粗骨材の分布を写し取り画像解析にて粗骨材面積率を測定した。

4 実験結果および考察

4.1 圧送前後のコンクリート品質の変動

(1) フレッシュコンクリート

ポンプ圧送前後におけるスランプフローの変動を図7に示す。圧送前のスランプフローが700mmを超えるものがあったが目視による観察では分離は見られなかった。どのコンクリートも圧送によるスランプフロー低下の傾向が見られ、低下量はLHCが最も大きかった。圧送前のスランプフローが600mm以下のものは、圧送により大きく低下する傾向であったが、600mm以上のコンクリートは混和剤を後添加した場合を除けば、圧送後に550~650mmとなり、既往の報告の傾向と同様であった。

圧送前のフロー時間はLHCで約3~6秒、SFCで約6秒であり、分離低減剤を使用したBPCでは約6~11秒であった。圧送後のスランプフローが500mm程度に低下したものはフロー時間が増加したが、圧送後のスランプフローが600mm以上のものは、LHCではフロー時間の変動はほとんどなく、BPC・SFCは減少する傾向が見られた。しかし、目視観察では分離は認められなかった。

圧送前後の空気量の変動を図8に示す。BPC・SFCでは圧送により空気量が0.7~1.4%増加する傾向が見られ、LHCは空気量の変動は小さかった。空気量の増加は、圧送時のホップ内での攪拌で空気を巻き込んだことが原因と考えられる。

図6 実大試験体の概要

図7 圧送前後のスランプフローの変動

図8 圧送前後の空気量の変動

図9 圧送前後の圧縮強度の変動

高強度コンクリートとHSCは圧送後スランプが約5cm低下し、空気量は約0.6%増加した。

(2) 硬化コンクリート

圧送前後の圧縮強度の変動を図9に示す。標準水中養生、現場水中養生とも各材齢における圧送前後の圧縮強度の変動は既往の報告の傾向と同様に小さく、圧送前後の差は5%以内であった。

4.2 ポンプ圧送性

図10に圧送距離と配管内圧力の関係を示す。吐出量が多いほど管内圧力が高くなった。設定吐出量30m³/hではLHC・HSCは同程度の管内圧力であり、配管長が短いBPC・SFCがLHC・HSCより管内圧力が高くなった。設定吐出量50m³/hではLHCがHSCを大きく上回り、BPC・SFCと同程度の圧力を示した。

図11に実吐出量と圧力損失の関係を示す。圧力損失は実吐出量に比例して増大し、スランプ21cmの普通コンクリート²⁰⁾と比べると高強度のHSCは約3倍、高流動は2.5～6倍で、LHC<SFC=BPCの順であった。高流動コンクリートは普通コンクリートおよびHSCに比べ圧力損失の増加割合が大きくなり、どのコンクリートも容積効率は80～80%となり、従来いわれている値(普通コンクリートで90%前後)²⁰⁾よりやや小さい値であった。

図11 実吐出量と圧力損失の関係

図10 圧送距離と管内圧力の関係

4.3 圧送後のコンクリート品質と吐出量の関係

図12に理論吐出量とスランプフロー低下率の関係を示す。吐出量が大きくなるとスランプフロー低下率も大きくなる傾向が見られた。吐出量を適切に設定し管理することが、圧送前後のコンクリート品質の変動を小さくおさえるために必要といえる。

4.4 流動状況

図13にBPC・LHCを壁試験体へ打設した時の流動状況及びコア供試体採取位置を、表4に各層に打設したコンクリートの圧送前後のスランプフロー、理論吐出量、流動勾配を示す。

LHCの3層目は、配管内に約40分間滞留したコンクリートを再圧送したため流動性が低下し、筒先を移動させながら打設したが、それ以外の層は流動勾配が10/100～20/100となった。BPCの流動勾配は5/100～13/100であり、いずれのコンクリートも配筋の密な柱部分にも充填された。

図14に圧送後のスランプフローと流動勾配の関係、図15に理

表4 各層のスランプフロー、理論吐出量、流動勾配

打 設 層	LHC			BPC		
	フロー(mm)	理論吐出量	流動勾配	フロー(mm)	理論吐出量	流動勾配
	圧送前/圧送後	(m ³ /h)		圧送前/圧送後	(m ³ /h)	
1	723/608	30.5	10/100	658/578	32.7	13/100
2	685/510	36.6	20/100	710/646	29.3	6/100
3	532/388	34.1	64/100	670/643	29.2	9/100
4	665/615	32.9	15/100	670/643	27.9	5/100

図12 理論吐出量とスランプフロー低下率の関係

図14 圧送後のスランプフローと流動勾配の関係

図15 理論吐出量と流動勾配の関係

論吐出量と流動勾配の関係を示す。吐出量の増大に伴い流動勾配は大きくなる傾向が見られ、BPCとLHCの勾配の差は吐出量による影響があると考えられる。

4.5 構造体コンクリートの品質

図16に流動距離と壁試験体から採取したコア供試体の圧縮強度との関係、図17に流動距離とコア供試体の静弾性係数との関係、図18に流動距離とコア供試体の粗骨材面積率の関係を示す。コア供試体の強度は標準水中養生供試体をほぼ上回ったが、これは環境温度が高かったためと考えられる。粗骨材面積率はLHCが平均30.5%、BPCが平均31.1%と調査から求めた面積率31.2%を中心に分布している。BPCでは層の上部が平均26.4%、下部が平均34.4%と、上部より下部の粗骨材面積率が大きくなる傾向が見られた。

流動時にモルタルが先走る様子が見られたが、流動距離による圧縮強度、静弾性係数および粗骨材面積率の減少傾向は認められなかった。

5 まとめ

今回の高流動コンクリートの実大施工実験の結果、既往の研究成果と同様の傾向を検証できた。本実験で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 圧送前のスランプフローが小さいと圧送によるスランプフローの低下が大きく、圧送時の吐出量が大きいほど低下率が大きくなる傾向が見られた。これは既往の報告と同様の傾向であった。圧

図13 流動状況およびコア供試体採取位置

送によるフロー時間の減少・空気量の増加の傾向が見られたが、圧縮強度は既往の報告と同様に変動はなかった。

(2) 高流動コンクリートは普通コンクリートおよび $F_c=42$ N/mm^2 の高強度コンクリートに比べ圧力損失が大きく、 $LHC < SFC \leq BPC$ の順となった。また高流動コンクリートは吐出量に伴う圧力損失の増加割合が大きい。

(3) 吐出量の増加に伴いコンクリートの流動勾配が大きくなる傾向であった。圧送前後の品質変動および打設時の流動性を保つためには、吐出量を適切に設定することが必要といえる。

(4) 壁試験体から採取したコア供試体の粗骨材面積率は層の上部が下部に比べ小さくなる傾向が見られたが、粗骨材面積率、圧縮強度および静弾性係数の流動距離による減少傾向は認められなかった。

謝 辞

本実験を遂行するに当たり、多大な協力を賜った三菱マテリアル(株)セメント研究所の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 笠井芳夫ほか：フローイングコンクリートに関する研究（その1～7），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 937～950，1992.8
- 2) 平石信也ほか：フローイングコンクリートに関する研究（その8～13），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1161～1172，1993.9
- 3) 西山直洋ほか：フローイングコンクリートに関する研究（その14～17），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 613～620，1994.9
- 4) 明石峰子ほか：高強度・高流動コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究，日本建築学会関東支部研究報告集，pp. 201～204，1995.3
- 5) 梶山 毅ほか：高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートのCFT構造柱への適用に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 697～702，1994.9
- 6) 横田和直ほか：高流動コンクリートの鋼製桁・鋼管充填コンクリートへの適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 49～54，1994.6
- 7) 和美廣喜ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，第466号，pp. 11～20，1994.12
- 8) 鈴木清孝ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 259～262，1994.9
- 9) 佐原晴也ほか：高流動コンクリートの高所圧送実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 225～230，1994.6
- 10) 久保田昌吾他：低熱セメントを用いた高強度コンクリートの施工性および強度発現性状に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 277～282，1994.6
- 11) 田中 斉ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1101～1102，1993.9
- 12) 大友 健ほか：高強度・超流動地下連続壁コンクリートの充填性試験，大成建設技術研究所報，第26号，pp. 93～106，1993
- 13) 岩清水隆ほか：シリカフェーム超高強度コンクリートによるRC耐震壁付きラーメン架構の実大施工実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 1，pp. 87～92，1993.6
- 14) 竹田宣典ほか：高流動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. 230～236，1994.6
- 15) 安田正雪ほか：高流動コンクリートの実大壁部材への打込み実

図16 流動距離とコア供試体の圧縮強度の関係

図17 流動距離とコア供試体の静弾性係数の関係

図18 流動距離とコア供試体の粗骨材面積率の関係

験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 237～242，1994.6

- 16) 依田和久ほか：高流動・高強度コンクリートの実大構造物への適用に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15，No. 1，pp. 221～226，1993.6
- 17) 友澤史紀ほか：各種高流動コンクリートの特性評価および実大模型打設実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1145～1159，1993.9
- 18) 藤田康彦ほか：超高強度現場打ちコンクリートの研究（その10），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1059～1060，1993.9
- 19) 小谷野秀雄ほか： $F_c 600$ kgf/cm^2 級高強度コンクリートの施工実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 263～266，1994.9
- 20) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，1994

[1995年6月30日原稿受理 1995年8月25日採用決定]