

論文

[1036] 高流動コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察

竹田宣典*1・十河茂幸*2・青木 茂*3・平田隆祥*4

1. はじめに

施工の合理化と構造物の高品質化を目的として、高流動コンクリートを用いて構造物を施工する例が増えている。高流動コンクリートは、流動性を高めることに対する高い分離抵抗性が必要である。そのため、増粘剤を用いたり単位粉体量を増加することにより、粘性を増大させることが多いが、ポンプ圧送時の圧送抵抗が増加し、コンクリートを長距離圧送することや高所圧送することが困難となることが予測される。高流動コンクリートをポンプ圧送した場合の、施工性および品質の変動に関しては、いくつかの理論的考察[1] および施工報告[2], [3] があるが、条件を整理し施工計画を立てられるだけの十分なデータが整っていないのが現状である。筆者らは、いくつかの実施工において、高流動コンクリートのポンプ圧送性について調査する機会を得た。

本報告では、管内圧力および圧送による品質変化等より、高流動コンクリートのポンプ圧送性について考察した結果について述べる。

2. ポンプ圧送実験概要

表-1 試験対象構造物とポンプ車の性能

2.1 構造物および圧送方法

圧送実験を実施した構造物および使用ポンプ車の性能を表-1に示す。また、

圧送管の配管状態を図-1

に示す。【実験A】では、

橋梁基礎側壁において約

40mの下方圧送を行い、【実験B】、【実験D】では、橋梁基礎ベースマットおよびシールド2次覆工において、水平距離300m以上のポンプ圧送を行った。実験A, C, Dでは125A(内径131mm)の圧送管を用い、吐出口にはフレキシブルホースを用いた。実験Bでは200A(内径205mm)の圧送管を用い、吐出口にはゲートバルブを用いた。また、設定吐出量は20~70m³/hrの範囲とした。いずれの実験においても、高流動コンクリートを圧送し、実験A, Dでは比較のために普通コンクリート(スランプ15~18cm)を同一の条件で圧送した。ポンプ車は、最大吐出量70~110 m³/hr、最大理論吐出圧力72~82kgf/cm²(高圧圧送時)の油圧ピストン式のものを用いた。

実験	構造物の種類、打設部位	ポンプ圧送方法		使用コンクリート		打設速度 (m ³ /hr)	最大吐出量 (m ³ /hr)	最大理論吐出圧力 (kgf/cm ²)	ピストンシリンダー	
		圧送管の種類	配管方向 水平 鉛直	高流動コンクリート	普通コンクリート				内径 (mm)	最大ストローク (mm)
A	橋梁基礎側壁	125A	20m 40m	○	○	40~70	100 (68)	52.9 (82.6)	205	1,400
B	橋梁基礎ベースマット	200A	330m 2m	○	-	25~50	110 (78)	46.0 (71.8)	220	1,400
C	工場水槽壁	125A	125m 6m	○	-	20~60	100 (60)	50 (82)	205	1,650
D	シールド2次覆工	125A	320m 20m	○	○	15~25	70 (45)	49 (77)	180	1,500

* ()内は高圧圧送時の値

2.2 使用材料および配合

高流動および普通コンクリートの配合を表-2に、使用材料を表-3に示す。実験Aではメチルセルローズ系の増粘剤を用い(配合①)、実験Bでは低発熱セメントと石灰石微粉末を合計した単位粉体量を410 kg/m³とした(配合②)。実験Cではビーライト高含有セメントを540kg/m³

* 1 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員, 工修(正会員)
 * 2 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員, 工博(正会員)
 * 3 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員, (正会員)
 * 4 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員 (正会員)

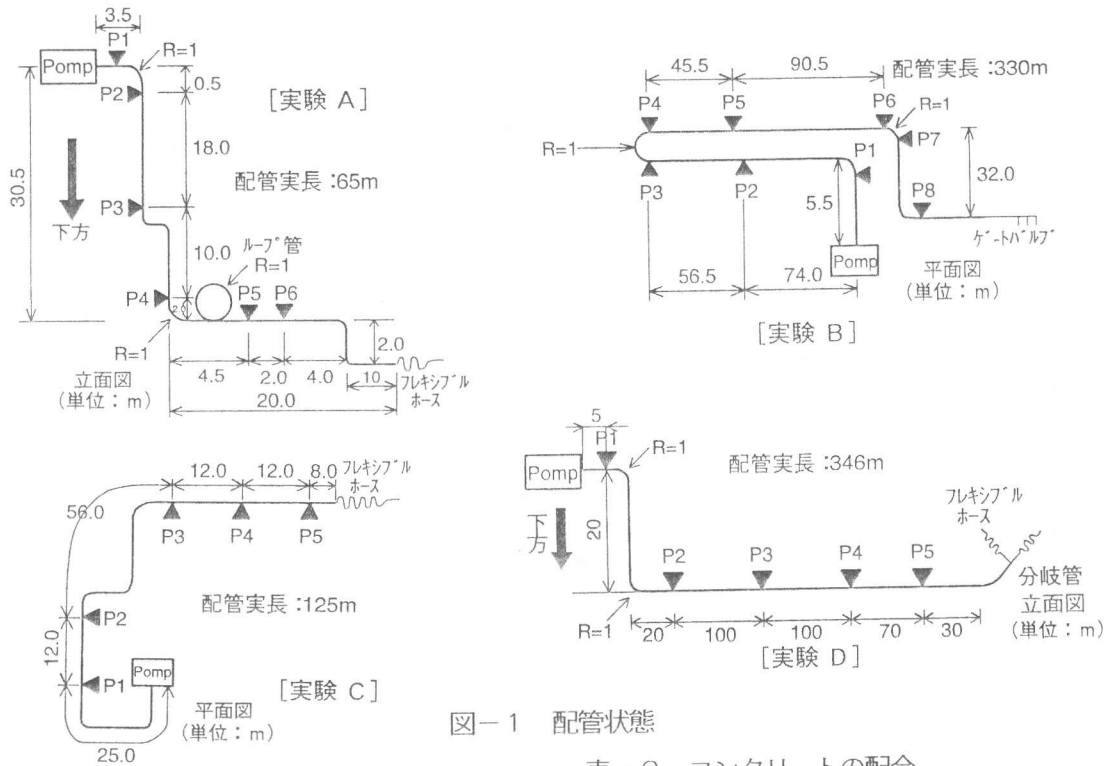


図-1 配管状態

表-2 コンクリートの配合

(配合③)用い、実験Dでは単位粉体量を 520 kg/m^3 とした(配合④)。粗骨材の最大寸法は、実験A, C, Dでは $20\text{mm} \sim 25\text{mm}$ とし、実験Bでは 40mm とした。高流動コンクリートは、高性能AE減水剤を用い、所要の流動性が得られる様にした。

実験NO	配合NO	種類	G_{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)							
						水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	石粉 (Lf)	AE減水剤 (Px%)	高性能AE減水剤 (Px%)	増粘剤 (MC)
A	①	高流動コンクリート	25	46.0	43.0	150	326	807	1072	0	0.25 (R)	3.5% (M)	0.8
B	②	高流動コンクリート	40	53.8	45.0	140	260	774	972	150	—	1.7% (Po)	—
C	③	高流動コンクリート	20	30.0	50.9	162	540	861	844	0	—	2.4% (P)	—
D	④	高流動コンクリート	20	43.2	54.0	160	370	794	834	150	—	1.9% (A)	—
A	⑤	普通コンクリート	25	50.0	48.0	150	300	911	989	0	0.25% (R)	1.0% (N)	—
D	⑥	普通コンクリート	20	56.0	54.0	179	320	817	920	30	0.20% (O)	—	—

M: マリンスルホン酸系 R: リチウム系 R: リチウム系 Po: ポリアクリル酸系 O: オキシカルボン酸系 A: アミノカルボン酸系 N: ナフタレン系 MC: マルチメチル系 P: 粉体量 (セメント+石粉)

2.3 コンクリートの性質

高流動コンクリートの圧送前のスランプフローは、実験Aでは $50 \sim 55\text{cm}$ 、実験Bでは $45 \sim 55\text{cm}$ 、実験Cでは $60 \sim 70\text{cm}$ 、実験Dでは $65 \sim 70\text{cm}$ であった。空気量は実験A, B, Dでは $4 \pm 1.5\%$ 、実験Cでは 2% 以下であった。また、高流動コンクリートの粘性を簡便に調べるために図-2に示す漏斗型試験装置を用いてコンクリートの流下時間を測定した。

表-3 使用材料

NO	セメント	細骨材	粗骨材	その他
① ⑤	2成分系低発熱セメント 比重: 2.79 比表面積: $3460 \text{ cm}^2/\text{g}$ 高炉スラグ含有率: 60%	登別産陸砂 比重: 2.79 粗粒率: 2.61 実積率: 67.1%	碎石 ($G_{\text{max}}=25\text{mm}$) 比重: 2.68 粗粒率: 6.64 実積率: 59.9%	
②	3成分系低発熱セメント 比重: 2.80 比表面積: $5270 \text{ cm}^2/\text{g}$ 中庸熱クォーク: 高炉スラグ: フライアッシュ = 25: 55: 20	海砂・砕砂混合 比重: 2.57 粗粒率: 2.72	碎石 ($G_{\text{max}}=40\text{mm}$) 比重: 2.63 粗粒率: 6.64	石灰石微粉末 比重: 2.71 比表面積: $3460 \text{ cm}^2/\text{g}$
③	ピラト高含有セメント 比重: 3.22 比表面積: $4310 \text{ cm}^2/\text{g}$ ピラト含有率: 58%	奥多摩産砕砂 比重: 2.64 粗粒率: 2.69	碎石 ($G_{\text{max}}=20\text{mm}$) 比重: 2.68 粗粒率: 6.59	
④ ⑥	高炉セメントB種 比重: 3.05 比表面積: $3630 \text{ cm}^2/\text{g}$ 高炉スラグ含有率: 42%	海砂・砕砂混合 比重: 2.57 粗粒率: 2.65 実積率: 59.9%	碎石 ($G_{\text{max}}=20\text{mm}$) 比重: 2.68 粗粒率: 6.69 実積率: 61.2%	石灰石微粉末 比重: 2.72 比表面積: $3900 \text{ cm}^2/\text{g}$

漏斗の形状は、材料分離の少ない高流動コンクリートが円滑に流下する様に、直管部の直径と長さの比を $1:2$ とした[4], [5]。漏斗流下時間は、配合①では 60 ± 3 秒、配合②, ③では 10 ± 3 秒、配合④では 7 ± 2 秒であった。

2.4 測定項目・測定方法

測定項目および測定方法を表-4に示す。それぞれの実験において、吐出量を変えた場合のポンプ車のピストン主油圧、管内圧力および圧送前後のコンクリートの品質の変化を調べた。また、実吐出量はピストンのストローク数およびトラックアジテータ車1台当りの打設時間より算出した。

管内圧力は、図-1に示す位置において測定を行なった。各測点での圧力の測定値より、式(1)、(2)を用いて、水平部および鉛直部の単位長さ当りの圧力損失を求めた。

$$\text{水平部圧力損失} (\Delta Ph) = (Ph_{i-1} - Ph_i) / \ell h \quad (1)$$

$$\text{鉛直部圧力損失} (\Delta Pv) = (Pv_{i-1} - Pv_i) / \ell v \quad (2)$$

$\{ Ph_{i-1}, Ph_i$: 水平管圧力、 ℓh : 水平距離
 $\{ Pv_{i-1}, Pv_i$: 鉛直管圧力、 ℓv : 鉛直距離

3. 実験結果および考察

3.1 管内圧力および管内圧力損失

(1) 管内圧力分布

管内圧力の分布を図-3に示す。実吐出量・ピストン主油圧・ストローク数・配管内の通過時間および1m当りの圧力損失の計算結果を表-5に示す。高流動コンクリートの圧送負荷は、普通コンクリートに比べて大きく、ピストン主油圧は、吐出量の増大に伴い増加する傾向を示した。

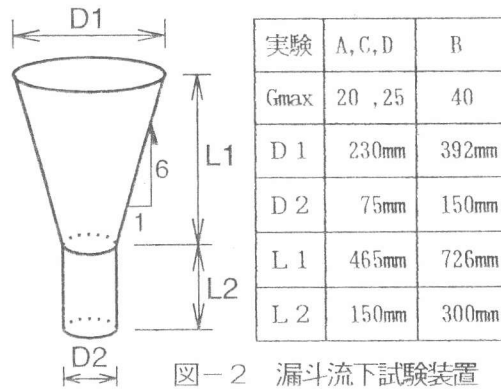


表-4 測定項目・測定方法

測定項目		測定方法	
ピストン主油圧		ポンプ車の圧力計の読みを記録	
ピストンストローク数		圧力波形記録より単位時間(1分)当たりのストローク数に換算	
管内圧力		圧送管に取りつけた圧力変換器の波形より算出(測定位置: 図-1)	
圧送コン前後のリークの品質	スランプロール	土木学会, 水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)に準拠	試験採取方法(圧送前)および車投入時に採取(圧送後)圧送管の筒先, 打設箇所から採取
	漏斗流下時間	コンクリートの流下時間を測定	
	空気量	JIS A 1128に準拠	
	コンクリート温度	アルコール温度計により測定	
	圧縮強度	材齢28日に試験(JIS A 1108)	

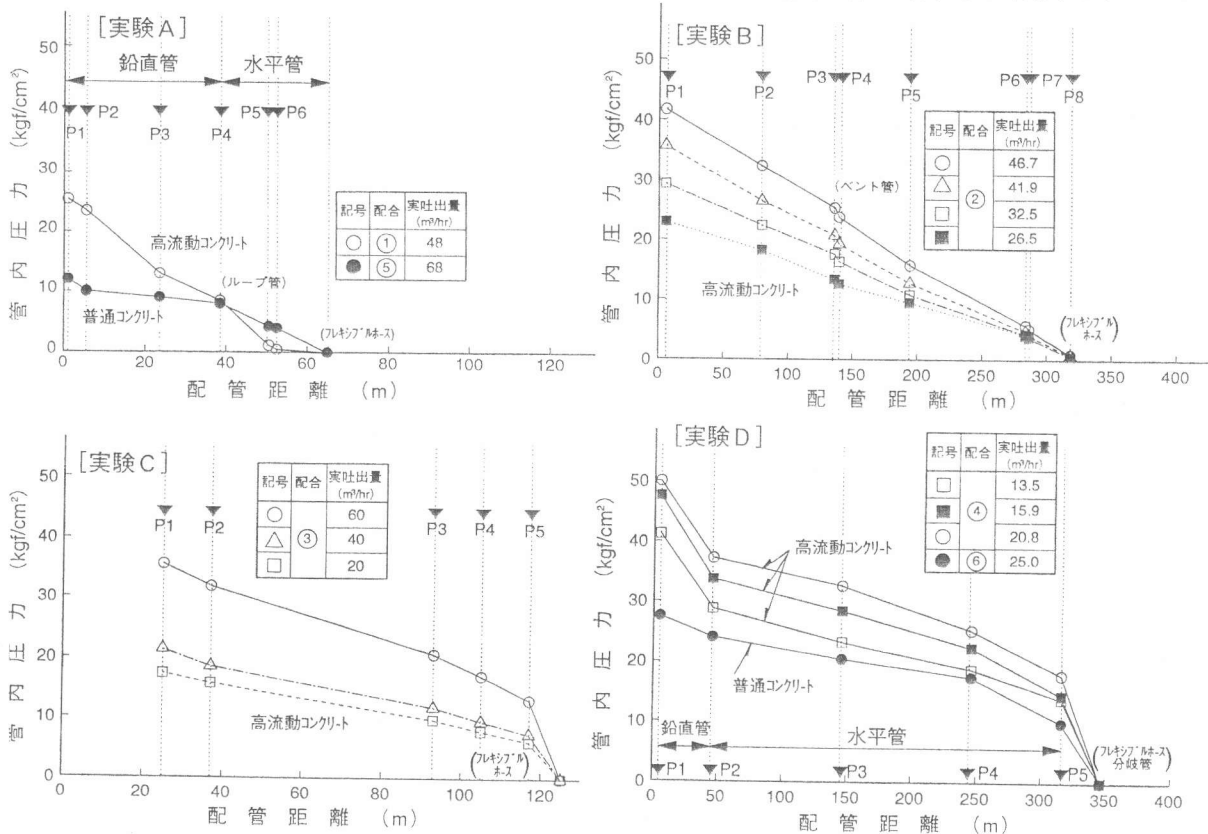


図-3 管内圧力分布

(2) 水平管の圧力損失

実吐出量と水平管1m当りの圧力損失の関係を図-4に示す。高流動コンクリートにおいても、管径を太くすると圧力損失は小さくなるが、同一の管径においては、吐出量が増大すると圧力損失も大きくなる傾向を示す。

粉体量を増加させた高流動コンクリートの水平管における圧力損失は、実吐出量20~25m³/hrの時、0.06~0.13

kgf/cm²/mであり、スランプ18cmの普通コンクリートの2~4倍であった。

増粘剤を用いて粘性を高めた高流動コンクリートの水平管における圧力損失は、実吐出量50m³/hr程度の時、0.47kgf/cm²/mであり、スランプ15cmの普通コンクリートの約5倍であった。

既往のデータ(土木学会コンクリート標準示方書等)におけるスランプ12cmの普通コンクリートの圧力損失と、今回の高流動コンクリートでの圧力損失を比較した場合、吐出量が小さい範囲では、高流動コンクリートの圧力損失の方が小さい場合があった。

(3) 鉛直管の圧力損失

実吐出量と鉛直管1m当りの圧力損失の関係を図-5に示す。高流動コンクリートを下方圧送した場合の圧力損失は、吐出量に変化した場合にも、0.6kgf/cm²/m程度であり、普通コンクリートの4~5倍であった。

3.2 圧送前後のコンクリートの品質変化

(1) スランプフロー

圧送前後のスランプフローの変化を図-6に示す。圧送後のスランプフローの減少は、増粘剤を用いた場合(配合①)では、3~5cmであるが、単位粉体量を増加させた場合(配合③, ④)では、5~10cmとなる場合があった。これは、増粘剤を用いた場合と単位粉体量を増加させた場合の加圧による脱水性状の違いおよびスランプの経時変化の影響と考えられる。

表-5 圧送試験結果および管内圧力損失

実験	配合	コンクリートの種類	圧送管の種類	吐出量 (m ³ /hr)	ピストン主油圧 (kgf/cm ²)	ストローク数 (N/min)	配管内の通過時間	圧力損失 (kgf/cm ² /m)		
								水平	下方	
A	①	高流動コンクリート	125A	48.0	180	21.5	1分10秒	0.47	0.57	
B	②		200A		26.5	115	10.0	22分30秒	0.068	—
					32.5	145	12.5	18分30秒	0.088	—
					41.9	185	15.8	14分30秒	0.113	—
					46.7	215	18.8	13分10秒	0.130	—
C	③		125A		26.6	65	10.2	3分30秒	0.13	—
				33.2	100	12.7	2分50秒	0.23	—	
				44.6	135	17.1	2分10秒	0.31	—	
D	④	125A		13.5	150	8.6	19分00秒	0.052	0.61	
				15.9	150	9.7	16分00秒	0.058	0.68	
				20.8	150	10.9	12分20秒	0.061	0.60	
A	⑤	普通コンクリート	125A	68.0	100	30.5	45秒	0.14	0.09	
D	⑥		125A	25.0	120	11.5	10分00秒	0.033	0.14	

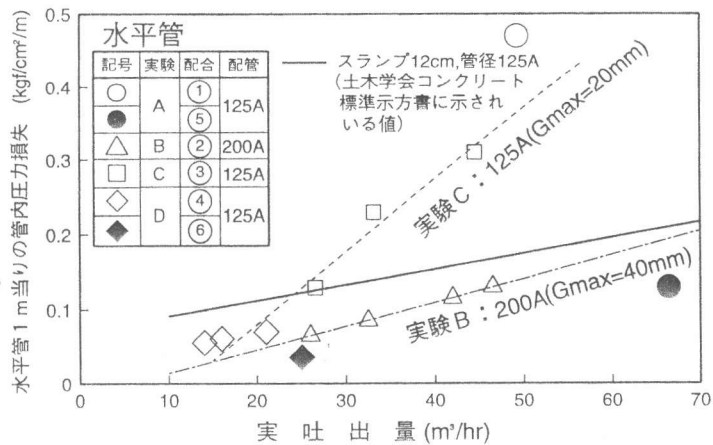


図-4 実吐出量と管内圧力損失の関係(水平管)

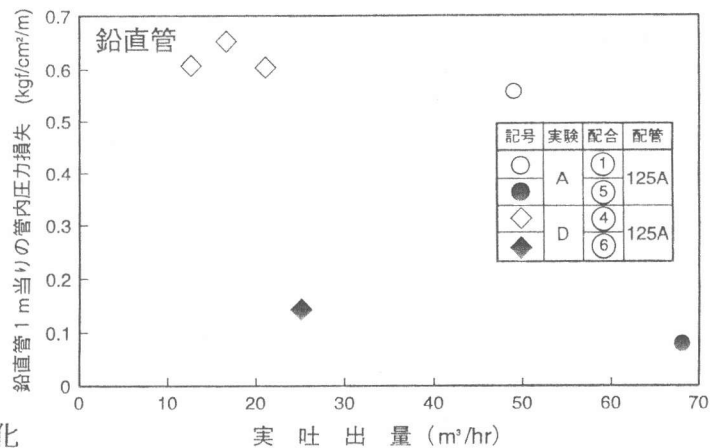


図-5 実吐出量と管内圧力損失の関係(鉛直管)

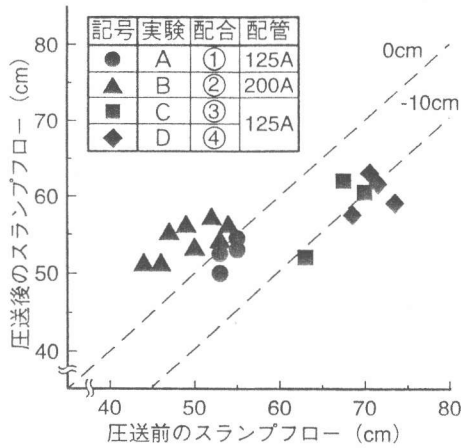


図-6 圧送前後のスランプフロー

実験 B (配合②) においては、圧送後のスランプフローは増加する傾向が見られた。これは、図-7に示す様にスランプフローが経時的に若干増大するため、圧送によるスランプフローの低下が現れなかったものと考えられる。したがって、圧送後のスランプフローを推定するには、スランプフローの経時変化および打設速度などを考慮する必要があると考える。

(2) 漏斗流下時間

圧送前後の漏斗流下時間の変化を図-8に示す。圧送前後の漏斗流下時間は、増粘剤を用いた配合では大きな変化はないが、単位粉体量を増加させた配合では、圧送後の漏斗流下時間が2~3秒減少し、圧送後のコンクリートの粘性が減少したと思われる場合があった。これは、圧送中のコンクリートの温度上昇、材料分離等の影響も要因として考えられる。

(3) 空気量

圧送前後の空気量の変化を図-9に示す。高流動コンクリートの空気量の変化は、圧送前後で-1.0%~+2.0%の範囲にあった。圧送後に空気量が増加する理由は、打設時に空気を巻き込むためと考えられる。

(4) コンクリート温度

いずれの実験においても、コンクリート温度は圧送後2~3℃上昇した。実験Dでは、温度25℃のトンネル坑内に配管しているため、圧送前の温度が14~19℃の時、圧送後に約3~5℃の温度上昇が見られた。

(5) 圧縮強度

圧送前後の圧縮強度の変化を図-10に示す。圧送前後の圧縮強度は、配合に関わらず大きな変化は見られなかった。

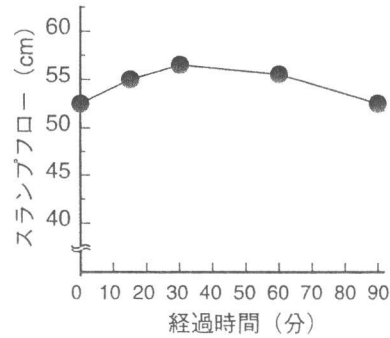


図-7 スランプフローの経時変化 (実験B)

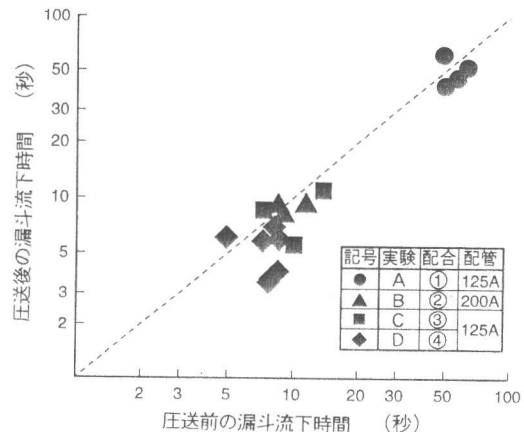


図-8 圧送前後の漏斗流下時間

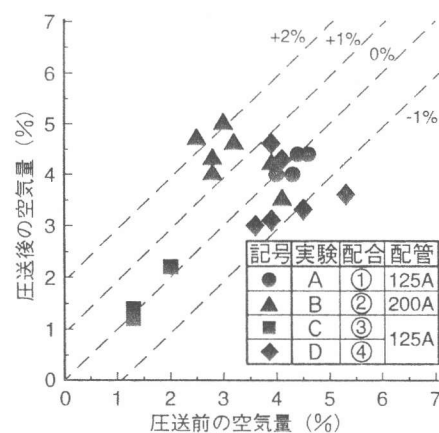


図-9 圧送前後の空気量

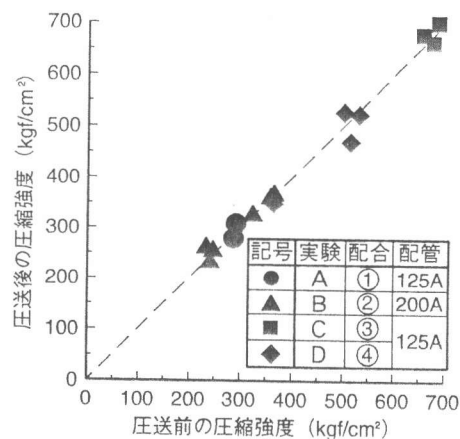


図-10 圧送前後の圧縮強度

3.3 コンクリートの粘性と圧送性

漏斗流下時間と水平管における圧力損失の関係を図-11に示す。図中には、粘性が非常に高い水中不分離性コンクリートの圧送試験の結果も比較のために示した。高流動コンクリートの圧力損失と漏斗流下時間は相関性が高いことが認められた。すなわち、高流動コンクリートの粘性が高くなると、管内圧力および圧力損失は大きくなると考えられる。また、吐出量が多くなると圧送抵抗は増大するが、その傾向は粘性の高いコンクリートほど顕著になる。

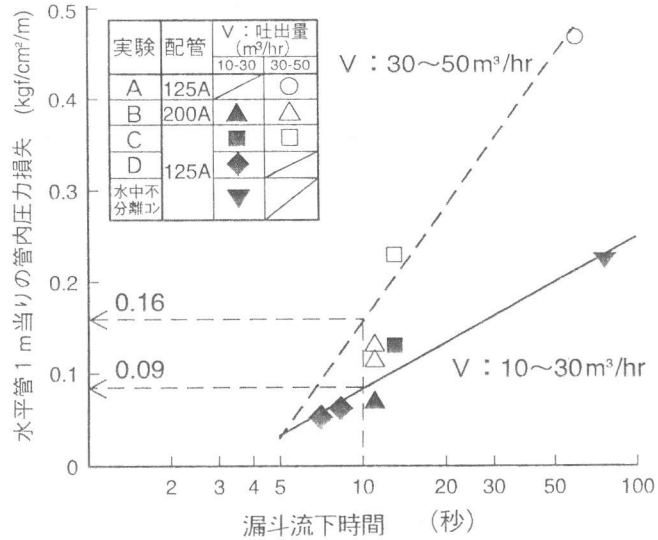


図-11 漏斗流下時間と管内圧力損失の関係

国内で最大級のコンクリートポンプ（最大理論吐出圧力：82kgf/cm²）を用いて、高流動コンクリートをポンプ圧送する場合の限界圧送距離の推定値を表-6に示す。最大圧送負荷が、ポンプ車の最大吐出圧力の80%以下の場合、圧送可能であるとして計算した結果、125A管を用い漏斗流下時間が10秒程度の高流動コンクリートを圧送する場合の限界圧送距離は、吐出量が10

表-6 高流動コンクリート限界圧送距離の測定値

漏斗流下時間 (秒)	実吐出量 (m³/hr)	圧力損失 (kgf/cm²/m)	限界圧送距離 (m)
10	10~30	0.09	730
	30~50	0.16	410

~30m³/hr の時、水平距離で730m程度、吐出量が30~50m³/hr の時、水平距離で410m程度となる。

4. まとめ

高流動コンクリートのポンプ圧送試験の結果を以下にまとめる。

- (1) 高流動コンクリートの水平部における圧力損失は、スランプ15~18cmの普通コンクリートに比べて、単位粉体量を増加させた場合で2~4倍程度、増粘剤を用いた場合で約5倍であった。
- (2) 水平部における圧力損失は、吐出量の増大に伴い大きくなる傾向を示すが、下方圧送する場合の圧力損失は、吐出量の影響は少なかった。
- (3) 高流動コンクリートの圧力損失と漏斗流下時間とは相関性が高いことが認められ、漏斗流下時間により、高流動コンクリートの限界圧送距離の推定が可能であると考えられる。
- (4) 高流動コンクリートのポンプ圧送による品質変化は、圧送自体による品質変化の他に、スランプフローの経時変化およびポンプ圧送速度等を考慮する必要がある。

今後、さらに高流動コンクリートのポンプ圧送性についてのデータを集積し、管径の影響、圧送方向の影響なども考慮した圧送抵抗の算定式を提案してゆく予定である。

【参考文献】

- [1] 谷川恭雄, 森 博嗣, 野田 豊: フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13-1, pp.203-208, 1991.6
- [2] 古屋信明, 斉藤哲男, 近松竜一, 十河茂幸: 石灰石微粉末を多量に用いたマスコンクリート用低発熱型高流動コンクリート, 土木学会論文集, No.466, V-19, pp.51-60, 1993.5
- [3] 早川光敬, 松岡康訓, 山田哲夫, 黒岩秀介: 超流動コンクリートの打放し建築構造物への適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, NO.1, pp.91-94, 1992.6
- [4] 近松竜一, 三浦律彦, 青木茂, 十河茂幸: 高流動コンクリートの流動性を評価する方法, セメント・コンクリート, NO.530, pp.60-66, 1991.4
- [5] 近松竜一, 竹田宣典, 平田隆祥, 十河茂幸: コンクリートの流下速度試験による打込みやすさの一評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13-1, pp.887-892, 1991.6