

各種セメントを用いた高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する検討

ものづくり大学
日大理工(院)
ものづくり大学(学部)

中田善久 (株)岡本建設重機 岡本圭市
大塚秀三 (前)足利工業大学 毛見虎雄
大木崇輔

1. はじめに

近年、高強度コンクリートを適用する建築物の増加が顕著であり、これにより一般的にコンクリートの粘性が高まり、これらのコンクリートをポンプにより圧送する場合、負荷が過大になることがある。特に、ブーム付コンクリートポンプ車(以下、ポンプ車と称する)を使用した場合に、過大な圧送負荷に起因すると思われるブームの折損事故が発生しており、建築現場において深刻な問題となっている。以前、筆者らは、26都県の圧送事業者65団体を対象としたアンケートを実施したが、ポンプ車の事故例としてブームの折損事故を挙げた回答が全体の約36%¹⁾を占めており、折損事故が少ないことが分かる。さらに、ブームの金属疲労による折損事故を含めたポンプ車の安全性向上を目的として日本建設機械化協会による検討委員会が発足したことから、社会的な認識は高まりつつあるといえる。しかし、レオロジー的考察、理論的考察、配管の管内圧力損失または粘性を考慮した管内圧力の挙動に関するものなど圧送するコンクリートからの観点での研究は数多く見られるものの、折損事故の主要因と考えられるブーム自体の挙動に関しての実験的な研究は、筆者らの把握している範囲内では見あたらない。

そこで、本研究は、高強度コンクリートの圧送に伴

うブームの挙動を把握するために、冬期において、異なる3水準のセメントおよびW/C=25~58.5%の

高強度から普通強度のコンクリートを用いて、圧送時におけるコンクリートの品質変化およびブームの挙動に関する実験を行ったものである。

ここでは、圧送に伴うコンクリートの品質変化として圧送前後のフレッシュコンクリートの性状および圧縮強度について調べるとともに、管内圧力の測定を行なった。さらに、ポンプ車のブームの挙動に関する検討として、ブーム先端の変位量および各段ブームの根元における曲げ応力について測定した結果について述べる。

2. 実験概要

(1) 圧送概要

実験機コンプラントにおいて製造されたコンクリートをトラックアジテータで運搬し、練混ぜ後120分経過した8水準のコンクリートを1水準あたり3m³ずつ圧送するものとした。各コンクリートの圧送時のオイルポンプの設定回転数は、表1に示すように1,000, 1,200および1,800rpm/minとしてポンプ車により圧送した。なお、M-27およびL-25では、ポンプ車の性能により1,200rpm/min以上では圧送できなかったため、1,800rpm/minの設定は除いた。さらに、表1中には、圧送中の実回転数およびオイルポンプのゲージ圧も付記した。また、圧送順序は、M, N, Lの順に行うものとし、セメントの種類ごとに先送りモルタルを0.5m³(M-47, N-58.5および

表1 オイルポンプの回転数およびゲージ圧

記号	オイルポンプの設定回転数 (rpm/min)	オイルポンプの実回転数 (rpm/min)	オイルポンプゲージ圧 (MPa)
M-47	1,000	1,000	9.3
	1,800	1,650	13.7~15.7
M-37	1,000	1,000	13.7~14.7
	1,800	1,800	19.6~21.6
M-27	1,000	1,000	19.6~23.5
	1,200	1,150	25.5
N-58.5	1,000	1,000	7.4~7.8
	1,800	1,800	9.8
N-45	1,000	1,000	9.3~9.8
	1,800	1,800	15.7
L-45	1,000	1,000	9.8~10.8
	1,800	1,800	15.7~16.7
L-35	1,000	1,000	13.7~17.6
	1,800	1,800	23.5~24.5
L-25	1,000	1,000	19.6~23.5
	1,200	1,200	23.5~26.5

1:オイルポンプ回転数の通常稼働最大値=2,200(rpm/min)
2:オイルポンプゲージ圧の通常稼働最大値=28.4(MPa)

表2 使用材料

材料	種類	品質・性状・主成分
セメント	中熟熱ポルトランドセメント(M)	密度: 3.21g/cm ³ 比表面積: 3,230cm ² /g
	普通ポルトランドセメント(N)	密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3,290cm ² /g
	低熱ポルトランドセメント(L)	密度: 3.22g/cm ³ 比表面積: 3,430cm ² /g
水	地下水	生コンプラント内井戸
粗骨材	M, L, N-45	栃木県安蘇郡 葛生町産: 砕石2005 表乾密度: 2.70g/cm ³ 粗粒率: 6.65, 実積率: 60.0% 吸水率: 0.59%
	N-58.5	栃木県栃木市 尻内町産: 砕石2005 表乾密度: 2.64g/cm ³ 粗粒率: 6.66, 実積率: 59.0% 吸水率: 1.21%
細骨材	栃木県栃木市 尻内町産: 陸砂	表乾密度: 2.61g/cm ³ 粗粒率: 2.75, 吸水率: 2.30%
化学混和剤	M, L, N-45	高性能AE減水剤
	N-58.5	AE減水剤
		ポリカルボン酸系化合物
		リグニンスルホン酸系化合物

Study on Concerning Pumpability of High-Strength Concrete for uses Various Cement

NAKATA Yoshihisa, OTSUKA Shuzo, OKI Sousuke, OKAMOTO Keiichi and KEMI Torao

表3 コンクリートの調合

セメントの種類	記号	フレッシュコンクリートの目標値			W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad (C×%)
		スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)			W	C	S	G	
M	M-47	21.0±2.0	-	4.5+1.0 -1.5	47.0	50.8	175	373	880	883	0.95
	M-37	-	50.0±7.5	4.5+1.0 -1.5	37.0	50.9	170	460	853	851	1.15
	M-27	-	60.0±10.0	4.5+1.0 -1.5	27.0	45.9	170	630	715	851	1.20
N	N-58.5	18.0±2.5	-	4.5±1.5	58.5	48.5	181	310	856	919	1.20
	N-45	21.0±1.5	-	4.5±1.5	45.0	50.2	175	389	861	883	1.00
L	L-45	21.0±2.0	-	4.5+1.0 -1.5	45.0	51.0	170	378	890	883	0.90
	L-35	-	50.0±7.5	4.5+1.0 -1.5	35.0	51.0	165	472	856	851	1.10
	L-25	-	60.0±10.0	4.5+1.0 -1.5	25.0	46.1	165	660	705	851	1.10

表4 ポンプ車の主な仕様

項目	仕様
最大理論吐出量(m ³ /h)	97
最高理論吐出圧(MPa)	5.4
コンクリートシリンダ数(本)	2
シリンダ内径×ストローク長(mm)	205×1,800
ブーム形式	油圧M型4段屈折式
ブームの最大長さ(m)	22.5
最大地上高さ(m)	25.9
先端ホース	5-4Bテーバ管, 4B×8m フレキシブルホース

びL-45の粗骨材抜き
の調合) ずつを先行
圧送し、コンクリ
ートの圧送後には配管
を洗浄した。

(2) 使用材料および
調合

使用材料を表2に、
コンクリートの調合
を表3に示す。

(3) ポンプ車の仕様
および配管計画

ポンプ車の主な仕
様を表4に、ポンプ車
の配管計画および測
定位置を図1に示す。
ポンプ車(M社製:DC-
SL1100BD-M26)は、
最大理論吐出量が
97m³/h、最高理論吐
出圧力が5.4MPaの性
能を有し、シリンダ
内径×ストローク長

が205×1,800mmの油圧シリンダを装着したピ
ストン式であり、ブーム形式が4段屈折式のも
のである。また、ブームの配管は5B管とし、ブ
ーム先端において5-4B管のテーバ管および先
端ホースとしてフレキシブルホース(4B管×8m)
を接続したものである。コンクリートの圧送中
は、図1に示すように1段ブームが地面に対し
て約30°とし、2~4段ブームが地面とほぼ水
平となるよう保持した。

(4) ブームの挙動に関する測定概要

ブームの挙動に関する検討として、図1に示
す位置において、表5に示す項目について測定
し、各コンクリートの圧送開始から終了まで断
続的に的に行った。

管内圧力

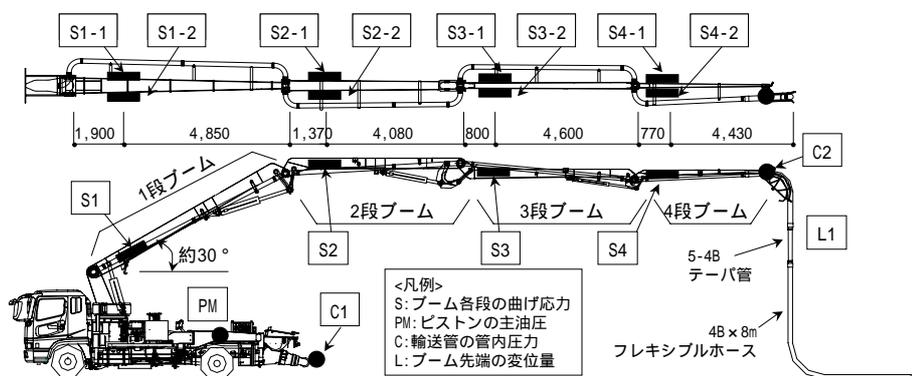


図1 ポンプ車の配管計画および測定位置

表5 ブームの挙動に関する測定概要

No	測定項目	記号	測定方法	測定概要	
1	各段ブームの曲げ応力	S1-1,2 S2-1,2 S3-1,2 S4-1,2	貼付ひずみゲージ	各段ブームの左右にひずみゲージを貼付、その測定結果から各段ブームの曲げ応力を算出した。なお、ブーム配管内におけるコンクリートの充足率を70%と仮定した。	
2	管内圧力	ピストンの主油圧	PM	圧力変換器	ピストンの主油圧から下式に示すとおりピストンの前面圧を算出し、管内圧力とした。 $P_c = P_h \times (od^2 - id^2) / R^2$ ここで、Pc:ピストンの前面圧 Ph:ピストンの主油圧 id:油圧シリンダ内径(110mm) od:油圧シリンダロッド外径(65mm) R:コンクリートシリンダ内径(205mm)
3	輸送管の管内圧力	C1,2	フラッシュダイヤフラム式圧力変換器	ポンプ車本体(C1)およびブーム先端(C2)における管内圧力の測定を行った。	
4	ブーム先端の変位量	L1	ビデオカメラの撮影画像	先端ホースの上下方向の変位量を撮影画像より読み取った。	

圧力変換器を用いたピストンの主油圧(PM)の
測定から表5に示す式によりピストンの前面圧
を算出し、管内圧力の基点とした。さらに、ピ
ストンから先の吐出口付近の管内圧力をC1、
ブーム先端付近の管内圧力をC2において、フ
ラッシュダイヤフラム式圧力変換器を用いてそ
れぞれ測定するものとし、3点における管内圧
力の変動について調べた。さらに、管内圧力の
測定結果から管内圧力損失を導いた。

各段ブームの曲げ応力

圧送に伴うブームへの負荷を検討するため
に、1~4段における各段ブームの根元付近の
左右2箇所にはひずみゲージを貼付け、そのひ
ずみ量から曲げ応力を算定した。

ブーム先端の変位量

ブーム先端の変位量は、圧送中のフレキシブルホースの挙動を固定されたビデオカメラにより撮影し、その撮影画像から上下方向の変位量を確認した。

3. 結果および考察

(1) 圧送前後のコンクリートの品質

圧送前後のコンクリートの品質を図2に示す。圧送前後のスランプおよびスランプフローは、ほぼ同等であり、圧送による顕著な影響は見られないが、L-25が大きく低下していた。L-25は圧送前後において14.5cmものスランプフローロスを生じたことは、経時変化が要因の一つとして考えられる。空気量は、N-58.5を除き圧送前後において1~3%程度増加する傾向となり、単位容積質量は、空気量の増加により圧送前後において低下する傾向を示した。さらに、圧縮強度は、水セメント比が低くなるほど圧送後の強度低下が著しい傾向となった。これらの原因として、コンクリートの粘性が大きいため圧送によりエンラップトエアを巻き込んだことが影響していると思われる。

(2) 管内圧力の検討

管内圧力分布を図3に示す。いずれの調査および圧送条件においても閉塞せず、圧送ができることが確認された。管内圧力は、いずれのコンクリートもオイルポンプの回転数1,000および1,200rpm/minに比して1,800rpm/minの方が増大する傾向があり、いずれの回転数とも水セメント比が小さくなるほど増大し、最大で5.0MPa程度となった。これから、ポンプ車の最高理論吐出圧力が5.4MPaであることから、性能限界に近い圧送状況であったことが分かる。管内圧力分布は、ピストン前面圧からC1がC1からC2の勾配に比して急勾配になる傾向を示したが、ポンプ車本体のテーパ管およびベント管により圧力損失が増大したものと考えられる。

管内圧力損失を図4に示す。管内圧力損失は、L-25を除きいずれのコンクリートとも、理論吐出量が大きくなるにつれて増大する傾向となり、回転数の違いによる増大量は、理論吐出量の違いはあるもののM-45, L-45およびL-35が顕著に大きくなる傾向であった。L-25のみ異なる傾向を示したが、圧送前後にスランプフローが低下した傾向からすると配管内におけるコンクリートの性状や流動特性が変化したことが影響したと考えられる。

(3) ブームの挙動

先端ホースの変位

先端ホースの変位量と理論吐出量の関係を図5に示す。先端ホースの変位量は、L-25を除き

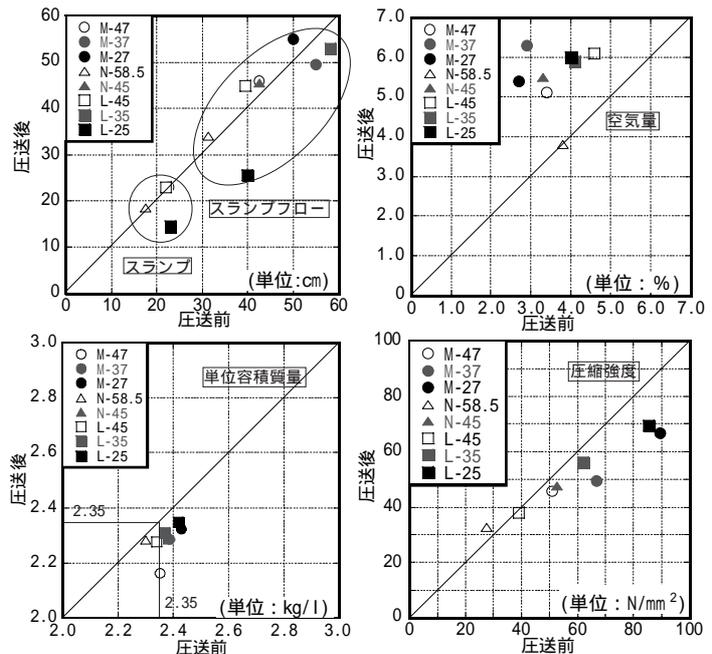
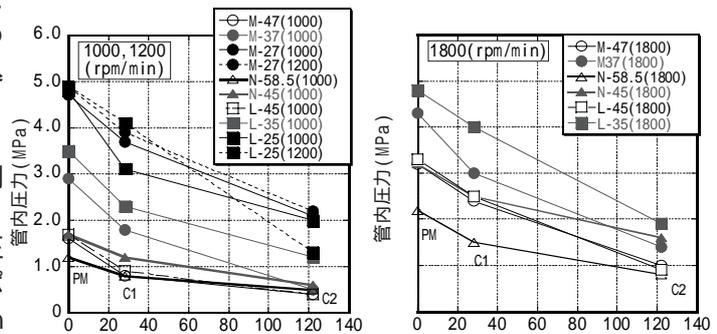


図2 圧送前後のコンクリートの品質



ブームの水平換算長さ(m)

図3 管内圧力分布

理論吐出量の増大に伴って、ほぼ比例する傾向となり、回転数の違いはあるものの水セメント比が小さくなるのに伴い、勾配が緩くなる傾向を示した。

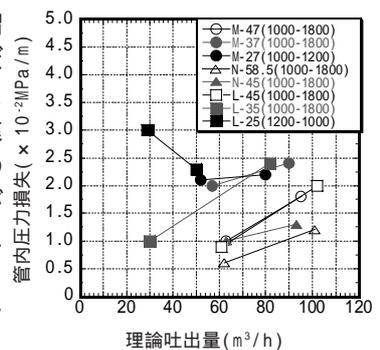


図4 水平管内圧力損失

先端ホースの

変位量比と理論吐出量比の関係を図5に示す。ここで、オイルポンプの回転数1,800または1,200rpm/minの変位量と1,000rpm/minの変位量で除した値を変位量比とし、オイルポンプ1,800または1,200rpm/minの理論吐出量を1,000rpm/minの理論吐出量で除した値を理論吐出量比とした。先端ホースの変位量比と理論吐出量比の関係は、L-25を除き水セメント比の小さい領域において、理論吐出量比の増加割合に対し、変位量比の増加割合が著しく大きくなかった。しかし、水セメント比が大きくなる

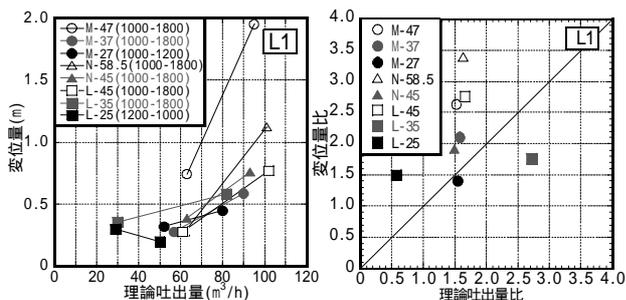


図5 先端ホースの変位量と理論吐出量の関係

と理論吐出量比の増加割合は大きくなり、変位量比の増加割合が著しく大きくなる。また、水セメント比の低い調合に比し水セメント比の大きい調合において勾配は急勾配になった。これにより、水セメント比の大きい調合において、回転数を上げると圧送の際に急激な負荷が瞬時に加わるものと考えられる。しかし、L-25は圧送に伴うスランプフローが低下したにもかかわらず、回転数を上げて理論吐出量比が減少し、変位量比の増加割合は微少であるが、この原因は不明である。

一般的なポンプ車で変位量を吐出量が50～60m³/hの時、先端の振れ幅を60cm以下²⁾としているが、M-37およびL-35は理論吐出量が60m³/hを超えても変位量はほぼ60cm以下となった。

各段ブームの曲げ応力

各段ブームの曲げ応力と理論吐出量の関係を図7に示す。L-25を除いて、各段ブームの曲げ応力は理論吐出量とほぼ比例関係にあった。また、ブームの先端(S4)に近接する程、曲げ応力が増大する傾向を示した。

各段ブームの曲げ応力比と理論吐出量比の関係を図8に示す。ここで、オイルポンプ1,800または1,200rpm/minの曲げ応力を1,000rpm/min時の曲げ応力で除した値を曲げ応力比とする。曲げ応力比と理論吐出量比の関係は、先端ホースの変位量比と理論吐出量比の関係に近似しており、S2およびS3ではほぼ変わらないものの、先端になる程曲げ応力比が増加する傾向が見られ、水セメント比が大きくなるに伴いその傾向が顕著であった。

4. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) スランプおよびスランプフローについては、ほぼ同等であったが、L-25の低下が著しい。さらに空気量は増大し、単位容積質量が減少すること、圧縮強度は、水セメント比が小さくなるにつれて低下するという傾向を示した。
- (2) 管内圧力損失、先端ホースの変位量および各段ブームの曲げ応力は、理論吐出量の影響が大きい傾向を示した。
- (3) ブームの曲げ応力は、ブームの先端(S4)が

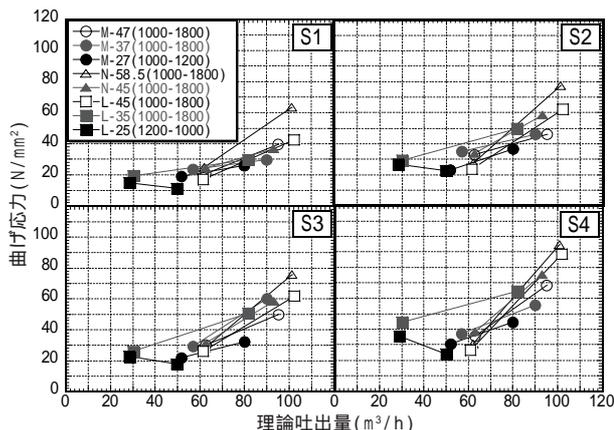


図6 各段ブームの曲げ応力と理論吐出量の関係

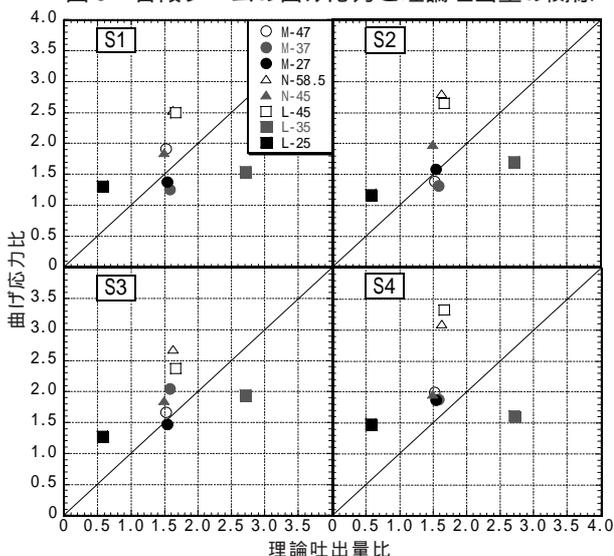


図7 各段ブームの曲げ応力比と理論吐出量比の関係

最も増大する傾向を示した。

今回の検討により、吐出量がブームの曲げ応力および変位量に影響を及ぼすことが明らかとなった。JASS 5では、ポンプ車で運搬する際には最大運搬量を70m³/hまで³⁾としているが、高強度コンクリートを圧送する際はポンプ車の吐出量を抑え圧送することで金属疲労による破損および折損事故などの防止に繋がると考えられる。今後については高強度コンクリートによる圧送に関するデータの蓄積とさらなる技術開発が望まれる。

【謝辞】

本実験を行うにあたり、三菱重工(株)より多大な御協力を頂くとともに、ものづくり大学建設技能工学学科 中田研究室の学生より多大なご協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

【参考文献】

- 1) 大塚秀三, 中田善久, 毛見虎雄: コンクリートポンプ車の実態調査と今後の動向, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.81-84, 2003.3
- 2) 全国コンクリート圧送事業団体連合会: コンクリートポンプ圧送マニュアル改訂版, p.103, 2000.1
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, pp.234-236, 2003