

# 報告 PC 箱桁ラーメン橋における上部工コンクリート圧送時の管内圧力の測定結果に関する報告

赤池 考起\*1・白岩 誠史\*1・栗原 浩彦\*2・森本 公彦\*3

**要旨:** PC 箱桁ラーメン橋の上部工のコンクリート打込みは、地上から数 10m の高さまで水セメント比の小さい粘性の高いコンクリートを圧送により打ち上げるため、コンクリートが配管内で閉塞する可能性が高い。そのため、本工事では、地上、鉛直管上部、橋面上の 3 か所で管内圧力を測定し、圧力挙動を監視した。測定の結果、閉塞箇所の早期発見が可能であることが確認できた。また、測定した管内圧力の値から実吐出量、各輸送管の水平換算係数と水平管 1m 当りの圧力損失を算出し、スランプとの関係について確認を行った。

**キーワード:** 橋梁上部工、長距離圧送、管内圧力、水平換算係数

## 1. はじめに

本工事は、新潟県の山間部に位置する橋長 190m の 3 径間 PC 箱桁ラーメン橋を新設するものである。山間部は豪雪地帯となっていることから、冬季の施工が不可能となっている（施工可能期間 5 月～11 月）。また、橋梁上部工施工途中で雪荷重の作用を設計に考慮していないため、施工可能期間中に上部工のコンクリートの打込みを完了させなければならない。上部工のコンクリートの打込みは、水セメント比の小さい粘性の高いコンクリートを地上から 40m の高さまで鉛直配管により圧送するため、コンクリートが配管内で閉塞する可能性が高く、閉塞した場合の復旧作業が困難である。

2018 年 6 月から 10 月に行われた橋梁上部工コンクリートの打込みにおいて、打込み管理を目的とした管内圧力測定（管理実績あり<sup>1)</sup>）を行った。また、計測した管内圧力の結果から、実吐出量、各輸送管の水平換算係数と水平管 1m 当りの圧力損失を算出し、スランプとの関係について確認を行ったので報告する。

## 2. 打込み条件および計測条件

### 2.1 打込み条件

橋梁上部工におけるコンクリートの配合を表-1 に示す。呼び強度 40N/mm<sup>2</sup> の早強ポルトランドセメントを使用した配合である。そのため、水セメント比が小さく、粘性の高い配合となっている。また、上床版においては、ひび割れに伴う剥落を抑制するため、ポリプロピレン短

繊維補強材を現場にて後添加を行った。

コンクリートの打込みは、写真-1、図-1 に示すように、橋脚下部から配管により打ち込む。当現場は張出し架設による施工であり、打込み中の偏荷重による橋脚の傾斜を防止するため、橋脚左右の同じスパンのブロックを同時に打ち込んだ。そのため、写真-1 に示すように、各打設においてコンクリートポンプ車が 2 台必要となった。現場のヤードが狭いことから、コンクリートポンプ車にはアジテータ車をそれぞれ 1 台付けとした。また、打込みブロックが進むにつれてコンクリートの圧送距離は長くなる。

上部工の打込み実績を表-2 に示す。



写真-1 コンクリートポンプ車 2 台設置

表-1 橋梁上部工コンクリート配合 (40 15 25 H)

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤 Ad
25	15	37.9	4.5	39.3	153	404	678	1076	4.848

\*1 (株) 安藤・間 建設本部 土木技術統括部 土木設計部 (正会員)

\*2 (株) 安藤・間 北陸支店 土木部

\*3 丸河商事 (株)

## 2.2 圧力測定条件

管内圧力の測定位置は図-1 に示すように、圧力計 1 は地上部、圧力計 2 は鉛直管の上部、圧力計 3 は橋面上の水平部の 3 ヶ所とした。圧力計にはフラッシュダイアグラム型圧力計を使用し、コンクリートの打込み中は、管内圧力をパソコン上にリアルタイムで表示し、圧力挙動を監視した。管内圧力の測定は、P2 橋脚側のみで行った。

表-2 上部エコンクリートの打込み実績 (P2 側)

BL	打込み日	打込み開始	打込み終了	打込み時間	打込み量 (m <sup>3</sup> )
1	6月6日	9:32	13:54	4:22	56.0
2	6月20日	8:55	12:47	3:52	62.0
3	6月30日	8:57	13:15	4:18	58.0
4	7月11日	8:24	11:53	3:29	61.0
5	7月25日	7:55	10:58	3:03	61.0
6	8月8日	8:29	11:56	3:27	55.5
7	8月23日	8:46	11:43	2:57	51.5
8	9月5日	8:34	11:48	3:14	52.0
9	9月17日	8:25	11:42	3:17	48.5

## 3. 測定結果

### 3.1 管内圧力の測定結果

1BL における P2 橋脚側の打込み実績を表-3 に、管内圧力の測定結果を図-2 に示す。

1BL の測定では、1 台目の打込み時において配管内の閉塞が発生した。閉塞発生箇所を図-3 に示す。図に示すように圧力計 2 下方の鉛直配管の直線部で閉塞が発生した。閉塞した箇所の配管には、ペーストが付着していたことから、以前の打込みで残存したセメントペーストに今回打ち込んだコンクリートの骨材が絡まり閉塞した

表-3 1BL 上部エコンクリート打込み実績 (P2 側)

台数	打込み開始	打込み終了	打込み時間	スランプ (cm)
1	9:32	10:29	0:57	17.5
2	10:52	11:09	0:17	17.5
3	11:44	11:55	0:11	15.5
4	12:21	12:35	0:14	16.0
5	12:53	13:06	0:13	16.5
6	13:20	13:34	0:14	16.0
7	13:46	14:12	0:26	16.0

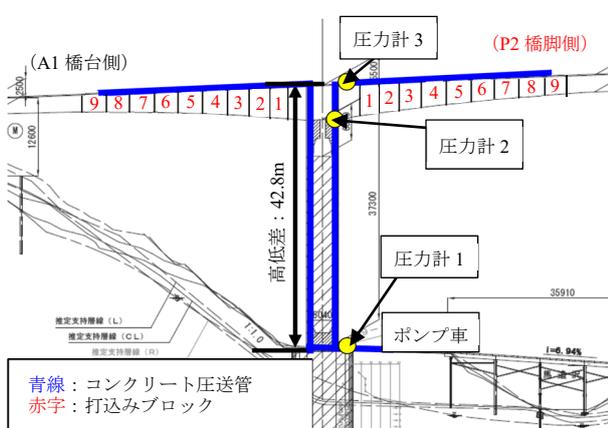


図-1 橋梁図、打込み概要図 (P1 橋脚)

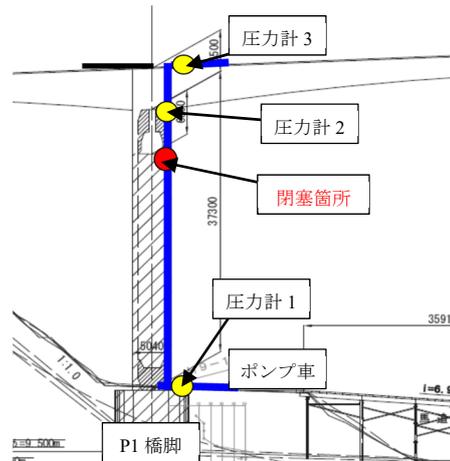


図-3 コンクリート閉塞箇所

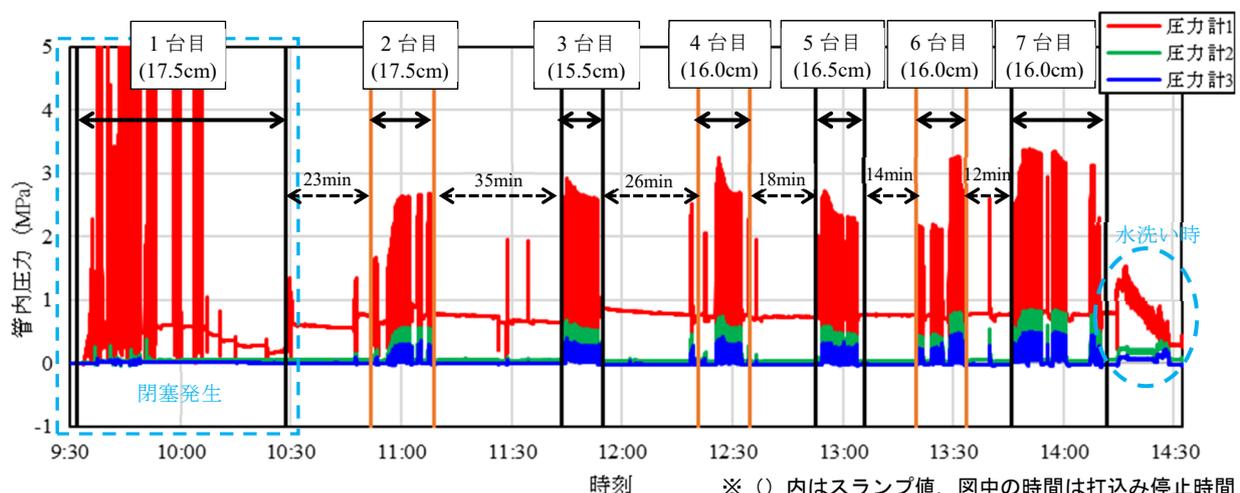


図-2 管内圧力測定結果 (1BL)

と考えられる。閉塞時の管内圧力を見てみると、閉塞箇所よりポンプ側にある圧力計1では、圧力の値が5MPa以上に急激に上昇していることが分かる。一方、閉塞箇所より筒先側にある圧力計2、圧力計3の圧力の値がほぼゼロとなっている。閉塞箇所を境にして、管内の圧力挙動が変わることから、閉塞の危険の高いベント管やテーパ管の手前で圧力測定を行うことで、閉塞発生時の閉塞箇所の早期発見が可能となる。しかし、圧力測定により事前に閉塞の前兆をとらえることは難しい。

図-2の4台目において、吐出量が一定であったにも関わらず、圧送開始時の管内圧力が増加している。これは、3台目の打込み終了から4台目の打込み開始まで26分経過しているため、配管内のコンクリートがスランプロスしたのではないかと考えられる。ここで、圧送を停止させずにコンクリートを打ち込んだ場合において、荷下ろし箇所から打込み箇所でのスランプロスは発生しなかった。また、3台目、5台目においても4台目同様に圧送開始時の管内圧力が増加している傾向が見られた。7台目の打設終了後の圧力挙動は、配管内の水洗いを行った圧力の挙動となっている。配管内のコンクリートが圧送負荷の小さい水と置き換わるに従い、管内圧力が減少していることが確認できた。6台目、7台目にはポリプロピレン短繊維補強材を後添加した。5台目と6台目を比較すると5台目終盤と6台中盤までに管内圧力に明確な違いは見られなかった。6台目の終盤において、管内圧力が上昇しているのは、吐出量を大きくしたことによる上昇であるため、今回の測定結果からは補強材の後添加による管内圧力の明確な違いは確認できなかった。

### 3.2 吐出量の算出

図-2の管内圧力の測定結果を拡大すると図-4のよ

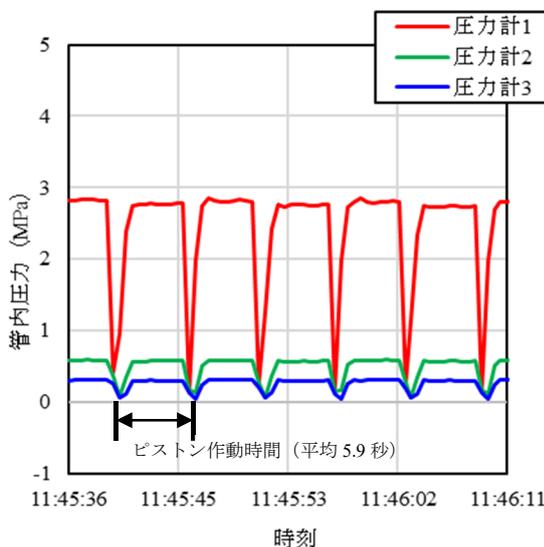


図-4 圧力結果拡大図 (6台目)

うに山が重なったデータとなる。この山は、ポンプ車のピストンが1回押されるごとに1つできる。吐出量(m<sup>3</sup>/h)が大きくなるとピストンの1ストロークにかかる時間も早くなるため山の幅が狭くなり、吐出量が小さくなると山の幅が広がる。これらのことより、管内圧力の測定結果から吐出量を求めると以下の式が成り立つ。

$$Q = \frac{PisV \times \alpha}{PisT} \quad (1)$$

ここに、Q：実吐出量 (m<sup>3</sup>/h)、PisV：ピストン容量 (ここでは、0.0582m<sup>3</sup>)<sup>2)</sup>、PisT：1ストロークにかかる時間 (h)、 $\alpha$ ：吸込み効率である。

吸込み効率 $\alpha$ は実績により求める。3台目において、アジテータ車1台(4m<sup>3</sup>)を打ち込むことに要した時間は8分51秒(8.85分)であった。また、1ストロークにかかる時間の平均値が5.9秒であったことから、式(1)より吸込み効率 $\alpha$ は、以下の式(2)のとなる。

$$\frac{4}{8.85/60} = \frac{0.0582 \times \alpha}{5.9/(60 \times 60)} \\ \therefore \alpha \doteq 0.764 \quad (2)$$

よって、ピストンの容量に対して、約76%のコンクリートを1ストロークで打ち込んでいることが確認できた。

### 3.3 水平管1m当りの圧力損失の確認

8BLの3台目において、圧力計1(P<sub>1</sub>)よりポンプ車側に圧力計(以下、圧力計4(P<sub>4</sub>)とする)を設置し(図-5参照)、水平管1m当りの圧力損失の確認を行った。3台目の測定結果の一覧を表-3に示す。圧力の測定値は、図-6に示すように、コンクリートが配管内を満たし、圧力が安定したところの各山の圧力が一定となったところの平均値を採用した<sup>2)</sup>。水平距離は、図-5に記載の水平管の1.8mとなっている。スランプに関しては、各アジテータ車の打込みを開始した時に試験を行ったスランプ値を採用した。吐出量に関しては式(1)、式(2)より算出した。未圧送時の差とは、図-6に示すように、コンクリートを圧送していない状況において、圧力計1と圧力計4に差(以下未圧送時の圧力差)が生じている。

表-3 3台目アジテータ車の測定結果(8BL)

管内圧力 (MPa)		未圧送時の 圧力差 D (MPa)	水平 距離 L (m)	スランプ (cm)	吐出量 (m <sup>3</sup> /h)
P <sub>1</sub>	P <sub>4</sub>				
4.421	4.606	0.164	1.8	15.0	35.4

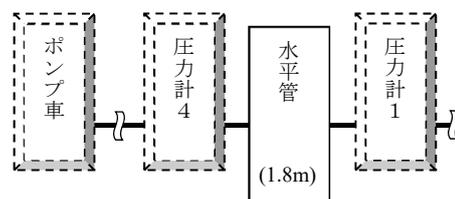


図-5 管内圧力測定結果(8BL3台目)

当初この未圧送時の圧力差はなく、管内圧力測定を行うに従い発生した。差が生じた原因として、使用した圧力計の繰返し性の精度の問題だと考えられる。このため、未圧送時の圧力差の影響を排除する必要があると判断し、以下の式より水平管 1m 当りの圧力損失 (K 値) を算出した。

$$K = \frac{P_4 - P_1 - D}{L}$$

$$K = \frac{4.606 - 4.421 - 0.164}{1.8} = 1.17 \times 10^{-2} \quad (3)$$

ここに、K：水平管 1m 当りの圧力損失 (MPa/m)、P<sub>1</sub>、P<sub>4</sub>：圧力計 1、圧力計 4 の測定値 (MPa)、D：未圧送時の差 (MPa)、L：水平距離 (m) である。

今回の配合は、粗骨材の最大寸法が 25mm であり、高性能 AE 減水剤を使用しており、管径が 5B であることから、2017 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]<sup>3)</sup> に記載の水平管 1m 当りの圧力損失の標準値は図-7 となる。ここで、表-3 より、スランブが 15.0cm、吐出量が 35.4m<sup>3</sup>/h であることから、図より、水平管 1m 当りの圧力損失は 1.20×10<sup>-2</sup>MPa/m となる。計算で求めた値と同程度であった。

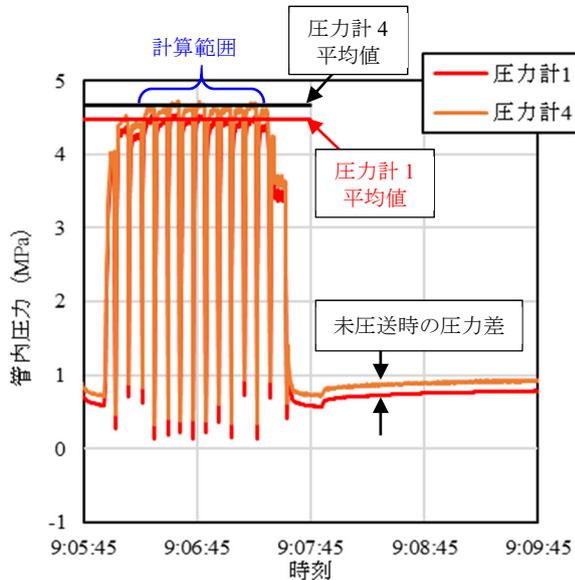


図-6 管内圧力測定結果 (8BL3 台目)

### 3.4 水平換算係数の算出

管内圧力の測定結果より、それぞれの圧送管の水平換算係数を求める。1BL における配管の条件を図-8 に、各アジテータ車の圧力計 1~3 の測定値、スランブ、吐出力、水平管 1m 当りの圧力損失 (K 値) を表-4 に示す。これらの測定値は、3.3 項に記載の方法で採用した。K 値に関しては、計算値と示方書の値が概ね同程度であったことから、図-7 を参考にスランブと吐出量の値から算出した。記載のないスランブの値に関しては線形補間を行って算出した。2 台目の結果を例にして、各輸送管の水平換算係数を算出する。最初にフレキシブルホースの水平換算係数を算出する。コンクリート打込み中のフレキシブルホースは常に曲がった状態となっている。また、

表-4 各アジテータ車の測定結果 (1BL)

台数	管内圧力(MPa)			スランブ (cm)	吐出力 (m <sup>3</sup> /h)	K 値 ×10 <sup>-2</sup> (N/mm <sup>2</sup> /m)
	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>			
2	2.568	0.526	0.278	17.5	34.4	1.06
3	2.573	0.520	0.268	15.5	27.1	0.97
4	2.689	0.562	0.294	16.0	33.0	1.10
5	2.249	0.438	0.223	16.5	30.8	1.02
6	2.072	0.414	0.220	16.0	25.3	0.91

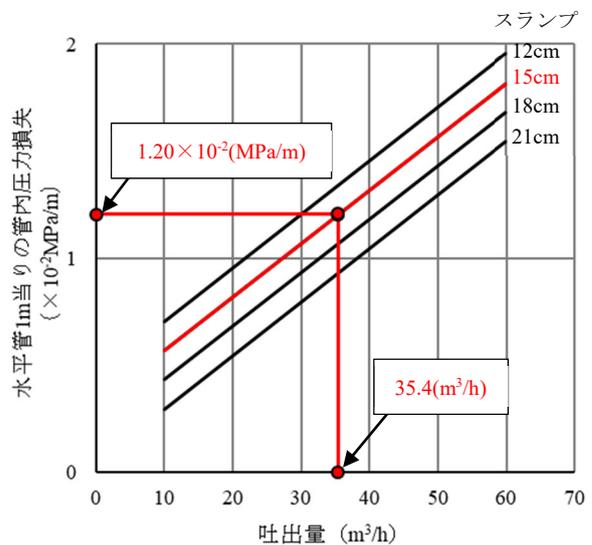
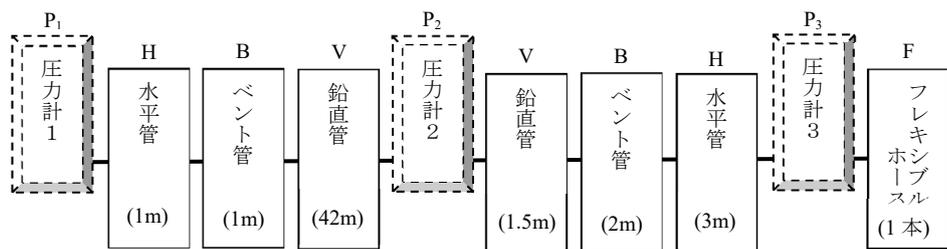


図-7 高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの圧送における水平管 1m 当りの圧力損失の標準値<sup>3)</sup>



※ベント管は実長による

図-8 配管条件 (1BL)

フレキシブルホースの先端での圧力をゼロとした。図-8より圧力計3の先には8mのフレキシブルホース1本のみであるため、水平換算係数は式(4)で求められる。

$$F = \frac{P_3}{K} \quad (4)$$

$$F = \frac{0.278}{1.06 \times 10^{-2}} = 26.2$$

ここに、F：フレキシブルホース1本当りの水平換算係数、P<sub>3</sub>：圧力計3の測定値(MPa)、K：水平管1m当りの圧力損失(MPa/m)である。

次にベント管、鉛直管の水平換算係数を算出する。圧力計1と圧力計2の間の配管条件および圧力計2と圧力計3の配管条件は図-8のようになるため、以下の2式が成り立つ。

$$P_1 - P_2 = (1 + 1B + 42V) \times K$$

$$2.568 - 0.526 = (1 + 1B + 42V) \times 1.06 \times 10^{-2} \quad (5)$$

$$P_2 - P_3 = (3 + 2B + 1.5V) \times K$$

$$0.526 - 0.278 = (3 + 2B + 1.5V) \times 1.06 \times 10^{-2} \quad (6)$$

ここに、B：ベント管の水平換算係数、V：鉛直管の水平換算係数、P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>：圧力計1、圧力計2の測定値(MPa)、K：水平管1m当りの圧力損失(MPa/m)である。

式(5)、式(6)を連立方程式で解くとベント管と鉛直管の水平換算係数は、

$$\therefore B \doteq 7.0, V \doteq 4.4 \quad (7)$$

となる。同様の計算方法で3台目～6台目で水平換算係数を算出した。算出した結果を表-5に示す。表には示方書に記載の水平換算係数もあわせて記載した。7台目においては、最終調整などの影響もあり、圧力が安定した時間が少なかったため採用しなかった。ベント管に関して、2台目～4台目においては示方書の値と比較すると1～2大きい値となった。5台目、6台目においては、概ね示方書の値と同程度となった。2台目～4台目において、スランプ測定時から圧力の値が安定するまでの時間経過により、スランプロスが発生し、実際のスランプ

表-5 各アジテータ車の水平換算係数算出結果(1BL)

台数	水平換算係数(1m当り)		
	ベント管	鉛直管	フレキシブルホース※1
2	6.9	4.4	26.2
3	7.9	4.8	27.6
4	7.4	4.4	26.7
5	6.0	4.1	21.9
6	6.0	4.2	24.2
平均	6.8	4.4	25.3
示方書	6	4	20

※1：フレキシブルホースは1本当りの圧力損失で記載

より計算では大きく評価したため、水平換算係数も大きくなったのではないかと考えられる。鉛直管に関して、平均値が4.4と示方書よりわずかに大きい値となったが、同程度であると考えられる。フレキシブルホースに関しては、示方書より大きい値となり、さらに、アジテータ車ごとにばらつきが大きくなっている。これは、打込み時のフレキシブルホースの曲がり方の違いによるばらつきだと考えられる。

#### 4. 吐出量と水平管1当りの圧力損失の関係図

水平管1m当りの圧力損失を求めるため、圧力計1～3までの水平換算距離を前項の各輸送管の実測値から求めた水平換算係数を用いて算出した。算出した結果を表-6に示す。比較のため示方書に記載のある水平換算係数を用いて算出した水平換算距離も併せて記載した。実測により求めた水平換算距離を用いて圧力計1から圧力計2の間で水平管1m当りの圧力損失を求めた。この結果と式(1)、(2)から求めた吐出量から1BLの2台目、3台目、5台目における吐出量と水平管1m当りの圧力損失の関係図を図-9に示す。吐出量において、1ストロークにかかる時間が平均値から±1秒以内のものに関しては平均値に丸めて算出した。また、図には示方書に記載のある管径5インチでスランプ15cmの実績値も併せて記

表-6 水平換算距離算出結果

箇所	水平換算距離(m)		差
	示方書	実測	
圧力計1	46.0	50.0	+4.0
圧力計2	221.0	242.6	+21.6
圧力計3	242.0	265.8	+23.8

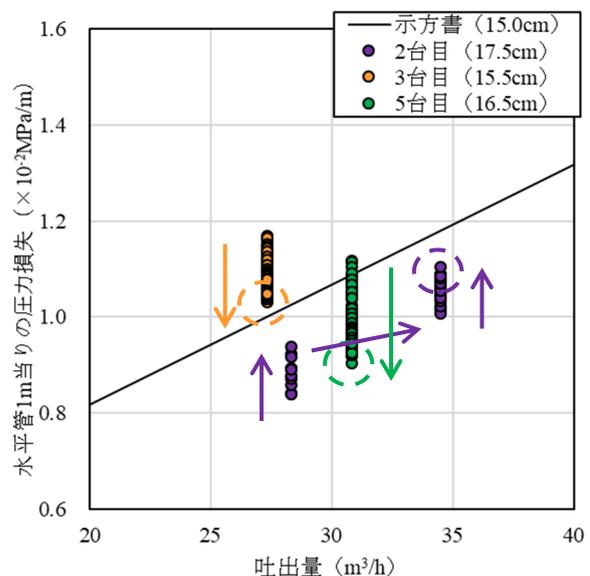


図-9 吐出量と圧力損失の関係(1BL)

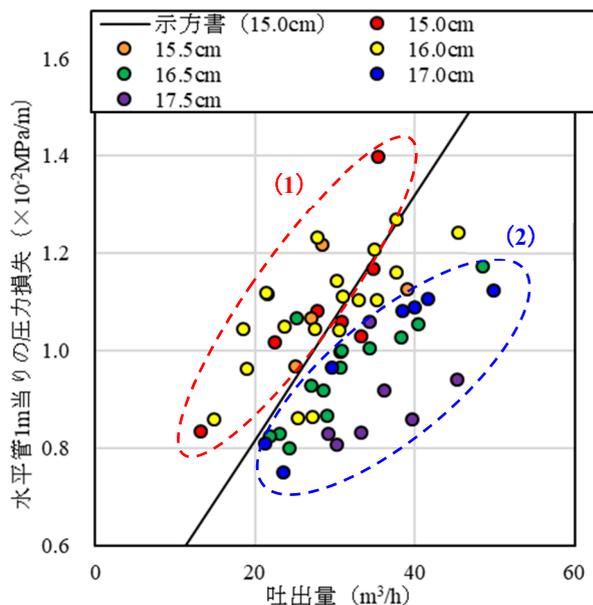


図-10 吐出量と圧力損失、スランプの関係

載した。図中矢印は時間経過による圧力損失の移動方向であり、点線で囲まれた範囲は、配管内のコンクリートがすべて入れ替わり、圧力損失の値が安定した範囲を示している。また、2台目においては打込み途中で吐出量を上げている。

2台目において、圧力損失が時間経過とともに大きくなっている。これは、2台目の打込み開始時は、1台目で閉塞が発生して、閉塞対応を行ったため、圧送管内にコンクリートは満たされていないが、2台目の打込みが進むにつれ圧送管内にコンクリートが満たされるに従い圧送負荷が大きくなり、圧力損失も大きくなったと考えられる。また、打設途中で吐出量が大きくなった時に、管内圧力も大きくなったことが確認できた。3台目、5台目において、圧力損失は時間経過とともに小さくなっている。両車とも前の車の打込みから時間が経過しており、配管内のコンクリートがスランプロスしたことにより、打込み初期の圧送負荷が大きくなり、圧力損失も大きくなったと考えられる。図中点線で囲まれた圧力損失が安定した部分の結果では、3台目（スランプ 15.5cm）の時に示方書に記載のスランプ 15cm の値より圧力損失が大きくなり、実際のスランプより小さく評価していることが確認できた。2台目（17.5cm）、5台目（16.5cm）においては、示方書の値より圧力損失が小さくなっている。2台目と5台目を比較すると、2台目の圧力損失が大きくなっている。これは、2台目の練り混ぜ開始から打込み終了までの時間が1時間36分かかっており（10台目

は50分）、打込み中にスランプロスを起こしたためだと考えられる。

次に、3BL～8BLにおいて、1BLと同様の計算方法で吐出量と水平管1m当りの圧力損失を算出した。算出した結果からスランプ毎に分類した関係図を図-10に示す。この結果は、各アジテータ車の圧力が安定した箇所の圧力計1と圧力計2の圧力差の平均値を用いて算出した。2BLと9BLについては、圧力測定の計測不備があったため算出を行わなかった。

図より、示方書の値(15cm)を基準に見てみると、スランプが小さい15.0cm～16.0cmにおいては、大半が上部に分布し、圧力損失も大きく(図-10中(1))、スランプが大きい16.5cm～17.5cmについては、大半が下部に分布し、圧力損失も小さくなっている(図-10中(2))。これらのことから、管内圧力を測定することによって、スランプの違いを確認できた。

## 5. まとめ

- 1) 管内の圧力測定を複数箇所で行うことにより、閉塞箇所の推定が可能であることが確認できた。しかし、圧力測定で閉塞の前兆を確認することはできなかった。
- 2) 管内の圧力測定により、圧送管内のコンクリートのスランプロス等の影響を把握できることが確認できた。
- 3) 実際の打込み結果より、吸込み効率を算出した結果、0.764という結果になった。
- 4) 圧力測定の実測により各圧送管の水平換算係数を算出した結果、バント管で6.8、鉛直管で4.4、フレキシブルホースで25.3となり、示方書より大きい値となった。
- 5) 実測値から吐出量と水平管1m当りの圧力損失の関係を求めた結果、管内圧力の測定値からスランプの違いを確認できた。

## 参考文献

- 1) 白岩誠史, 高瀬清隆, 吉浪雄亮, 村田安之: 高所長距離圧送への圧送改善剤の適用効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1413-1418, 2018
- 2) 一般社団法人全国コンクリート圧送事業連合会: 最新コンクリートポンプ圧送マニュアル, pp.299-310, p.141, 2019
- 3) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[施工編], pp.110-115, 2017