

論文 管内圧力及びポンプ主油圧による配管閉塞リスク管理手法の検討

茅根 夏樹*1・根本 浩史*2・永島 啓介*1・橋本 紳一郎*3

要旨：本研究は、コンクリートの圧送における配管閉塞時の管内圧力やポンプ主油圧のデータを測定することで、閉塞時における管内圧力やポンプ主油圧の変動の確認及び分析を行い、適切な配合の選定や圧送条件の設定などによる配管閉塞リスクを低減させるための対策について検討を行った。その結果、粗骨材量が多く、圧送速度 48m³/h 程度での圧送時には、配合による圧送の乱れの影響が顕著に現れることから、ポンプ主油圧や管内圧力の圧力波形を測定し、閉塞のリスクが高まった場合、圧送速度を下げる等の対策を講じることで、配管閉塞リスクを低減させることが可能であることが示唆された。

キーワード：圧送性、管内圧力、ポンプ主油圧、閉塞、近似線からの変動係数

1. はじめに

コンクリートの施工現場においてはコンクリートポンプ車が導入され、現在ではコンクリートポンプ車を用いたブーム圧送や配管圧送が主流となっており、ポンプ工法は、作業員の大幅な削減や生産性向上に重要な役割を担っている。したがって、コンクリートポンプ車は、コンクリート施工において欠かせない存在となっている。

一方で、コンクリート圧送中の様々なトラブルについても報告されている。トラブルとして最も多く挙げられるものが閉塞である。閉塞が生じた場合、閉塞の解除に伴う対応作業が必要となるだけでなく、コンクリートポンプや配管に負荷がかかることで配管の破裂などの危険なトラブルや事故に発展した事例も報告されている。

閉塞とは、主に圧送中にコンクリートが配管壁面との摩擦によって材料分離を起こした場合や、配管内の骨材が相互にかみ合いを起こした場合に発生する。これらの現象はコンクリートの材料や配合、圧送条件など様々な要因が関連しているが、現状では施工現場でコンクリートの圧送状態を確認及び評価する方法は実用化されておらず、圧送状態の異常や閉塞の発生は、ポンプの稼働状態や筒先からのコンクリートの排出状況を確認することで初めて気づく場合が多い。ゆえに、様々な圧送条件においても圧送状態を把握し、圧送状態を管理する方法が必要である。

既往の研究²⁾では、試験圧送において配管に圧力計や振動加速度計を取付け、管内圧力や加速度のピーク値から、圧送性の簡易評価手法について検討が行われている。しかし、コンクリートの圧送における配管閉塞時の管内圧力やポンプ主油圧の波形の傾向を分析し、考察した知見は少ない。

そこで本研究では、管内圧力及び圧力波形、ポンプ主

油圧のデータによる配管閉塞リスクの評価方法について、検討を行った。

2. 実験概要

本実験は、コンクリートの圧送における配管閉塞時の管内圧力やポンプ主油圧のデータを測定することで、閉塞時における管内圧力やポンプ主油圧の変動を確認し、その傾向を分析することで、適切な配合選定や圧送条件の設定などによる配管閉塞リスクを低減させるための対策を提案することを目的とした。なお、本実験は日平均気温 3.3℃、天候は晴れの環境下で実施した。

2.1 配管条件及び計測機器の設置位置

図-1 に、本実験における配管図及び計測機器の設置位置を示す。コンクリートポンプ車は最大吐出量 165m³/h、最大吐出圧力 8.5MPa のものを使用した。本実験の配管条件では、ポンプ吐出口(6B)から 1.0m のテーパ管(6B→5B 管)を接続し、合計水平換算距離 124.2m まで 5B 管を使用した。その後 1.2m または 1.5m のテーパ管(5B→4B 管)を接続し、4B 管を使用し水平換算距離 155.7m まで配管した。また、本実験では配管養生は実施せずに圧送を行った。

圧力計は、図-1 のように 10 箇所を設置し、それぞれの配管位置での管内圧力を確認した。また、骨材の乱れの影響を確認するため、ベント管及びベント管から約 1m 奥側の直管に振動加速度計を設置し、振動加速度の計測を行った。さらに、配合や圧送速度の違いによるポンプ主油圧の変動を確認するため、ポンプ車にセンサーを設置し、ポンプ主油圧の計測を行った。

2.2 実験ケース及び実験配合

表-1 に使用材料、表-2 に圧送試験で使用した実験ケース及びコンクリートの配合を示す。実験ケース No.1

*1 千葉工業大学大学院 創造工学研究科都市環境工学専攻 (学生会員)

*2 清水建設(株) 主査 博(工) (正会員)

*3 千葉工業大学 創造工学部都市環境工学科 教授 博(工) (正会員)

及び No.2 ではベースとなる配合(PL)を用い、PL 配合に対して粗骨材量をそれぞれ 20L, 40L, 60L 増加させた配合をそれぞれ実験ケース No.3, No.4, No.5 で用いた。また、5B 管から 4B 管へのテーパ管の長さは、No.1 では 1.2m, それ以外のケースでは 1.5m としている。これは、No.1 において、テーパ管部で閉塞が生じたことにより、No.2 以降のテーパ管の長さを変更したためである。

本実験では、No.1 の圧送前に先送り材(生コンスラッジを主成分とした圧送用先行剤: 31kg)を用い、配管内の総コンクリート体積約 1.5m³ に対し、配合ごとに 2m³ ずつ圧送を行うことで、配合ごとにコンクリートの全てが配管内で入れ替わるものとした。また、各実験ケースにおける圧送速度は 15m³/h, 32m³/h, 48 m³/h の 3 水準とし、管内圧力やポンプ主油圧の測定結果を分析することで、骨材量の違いや圧送速度が圧送性に与える影響を評価した。

各実験ケースにおいて、圧送前のコンクリートのフレッシュ性状は、スランプ試験(JIS A 1101)及び空気量試験(JIS A 1128)、コンクリート温度(CT)の測定(JIS A 1156)を実施した。いずれも荷卸し時の目標スランプ値は 18cm, 目標空気量は 4.5%とした。さらに圧送後の試料についても、試験を実施し圧送による性状の変化を確認した。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュコンクリートの試験結果

表-3 に、コンクリートのフレッシュ性状試験結果を示す。いずれの配合においても、圧送後のスランプ及び空気量の値は、圧送前と比較してやや低下する傾向を示した。圧送後のスランプの低下については、本実験の水平換算距離が 150m 以上であり、テーパ管を使用し 100A(4B)以下の径の小さい配管を接続していることによる流動性の低下に起因すると考えられる³⁾。また、一般的に、圧送による空気量の減少は、圧送距離 150m 以上の場合に 0.5~1.0%程度といわれている⁴⁾。本実験の実験配管長は 112.1m であり 150m 未満ではあるものの、テーパ管やベント管を多く配管していることにより、圧送中のコンクリートに負荷が生じ、圧送後の空気量が減少したことが考えられる。

3.2 各実験ケースの圧送状況

表-4 に、圧送実験における圧送状況を示す。No.1 は 5B 管から 4B 管へと管径が変化するテーパ管付近において閉塞が生じたため、1.5m のテーパ管に変更し、再圧送を実施した。その後、No.2 の圧送を実施し、順調に圧送が行われていることを確認した。

No.3, No.4 については No.1 及び No.2 以上に粗骨材量を増加させた配合であったが、本実験において閉塞は生じなかった。しかし、No.5 についてはポンプ車の根本付

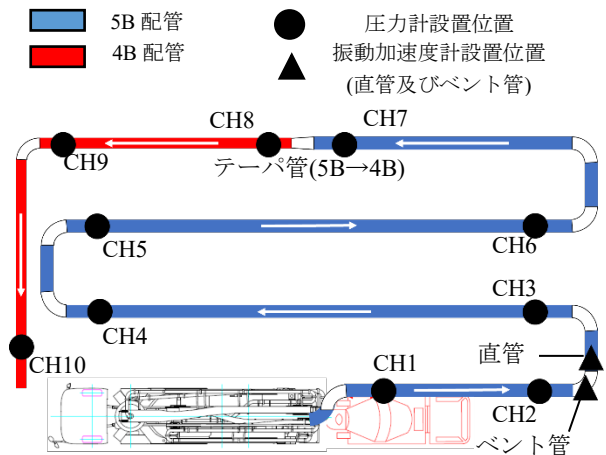


図-1 配管図と圧力計の設置位置

表-1 使用材料

使用材料	記号	内容
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³)
練混ぜ水	W	地下水(密度:1.00g/cm ³)
細骨材	S ₁	東京都西多摩産砕砂 (表乾密度:2.65g/cm ³ , 粗粒率:1.70)
	S ₂	千葉県君津産山砂 (表乾密度:2.59g/cm ³ 粗粒率:3.00)
粗骨材	G	埼玉県秩父産砕石 (表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率:58.0%)
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤

表-2 実験ケース及びコンクリート配合

実験 ケース No.	配合 名	テーパ 管 長さ (m)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					C	W	S ₁	S ₂	G	SP
No.1	PL	1.2	53.9	48.7	325	175	612	256	937	3.25
No.2	PL	1.5		48.7	325	175	612	256	937	3.25
No.3	G+20L	1.5		46.6	314	169	594	249	991	3.14
No.4	G+40L	1.5		44.4	302	163	572	241	1045	3.02
No.5	G+60L	1.5		42.4	291	157	554	233	1099	2.91

表-3 フレッシュ性状試験結果

実験ケース No.	配合名	採取時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)
No.1	PL	圧送前	20.0	4.8	11
		圧送後	19.0	4.0	12
No.3	G+20L	圧送前	19.5	4.6	11
		圧送後	18.5	3.9	12
No.4	G+40L	圧送前	18.0	4.4	11
		圧送後	16.5	3.8	11
No.5	G+60L	圧送前	14.5	4.5	11
		圧送後(閉塞)	12.0	-	-

近において閉塞が生じ、閉塞を解消した後に再圧送を行うも、ポンプ車根本付近で再度、閉塞が生じる結果とな

った。この要因として、No.5は他ケースと比べ粗骨材量の増加に伴いセメントペーストの容積が減少し、骨材がかみ合いを生じたことが考えられる。また、粗骨材量の増加によりスランプ値が低下したことも、No.5が閉塞を生じる要因の一つであったと考えられる。この結果から、本実験の条件において、テーパ管の長さが短いことや、配合に使用する粗骨材量が一定値を超えることが管内閉塞を生じる要因の一つであると推察される。

3.3 ポンプ主油圧の測定結果

図-2に圧送実験における順調圧送時の平均ポンプ主油圧の値を示す。本実験の順調圧送時における平均ポンプ主油圧は、圧送速度の上昇に伴い増加する傾向にあった。また、配合ごとに比較すると、粗骨材量の増加に伴いポンプ主油圧の値も増加した。これは、圧送速度の上昇や骨材量の増加により、コンクリートピストン前面にかかる負荷が増加したことが要因と考えられる。

3.4 管内圧力の測定結果

図-3に圧送実験における圧送速度ごとの平均管内圧力の測定結果を示す。本実験における平均管内圧力は、圧送速度の上昇に伴い増加する結果となった。また、配合ごとに比較すると、粗骨材量の増加に伴い管内圧力は増加しており、ポンプ主油圧と同様の傾向を示した。これは、圧送速度が上昇することで管内を流動するコンクリートの圧送負荷が大きくなり、配管壁面に生じる圧力が増加したためと推察される。

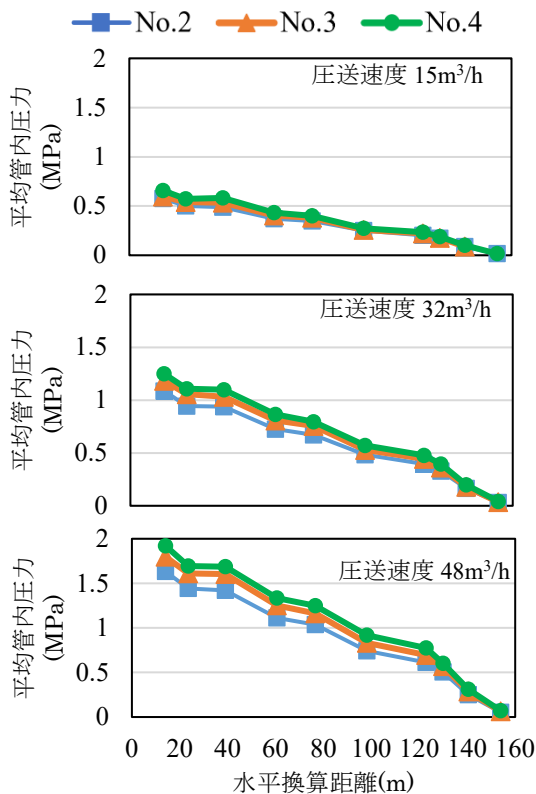


図-3 平均管内圧力

3.5 振動加速度計の測定結果

図-4に、No.2、No.3、No.4における、振動加速度計による直管及びベント管の加速度のピーク値の差分値の結果を示す。いずれの配合も、圧送速度の上昇に伴い加速度差分値は増加する傾向にあり、粗骨材量の増加に伴い加速度の差分値は増加する傾向であった。既往の研究⁴⁾では、直管とベント管の加速度差分値が3.0m/s²以上であった場合、圧送が不安定または閉塞の可能性があるとされている。これらの結果から、No.4の圧送は振動加速度の観点から、閉塞を生じるほどではないが、No.2、No.3と比較して乱れのある圧送であったといえる。

表-4 圧送試験の状況

実験ケースNo.	配合名	圧送状況
No.1	PL	閉塞(テーパ管付近)
No.2	PL	順調圧送
No.3	G+20L	順調圧送
No.4	G+40L	やや乱れた圧送
No.5	G+60L	閉塞(ポンプ車根本付近)

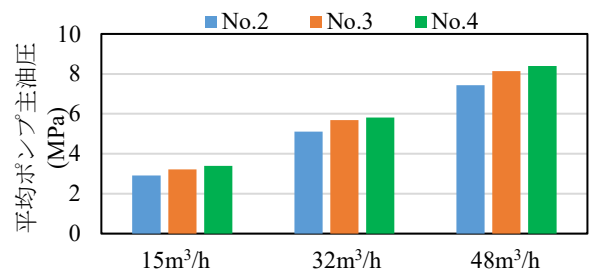


図-2 平均ポンプ主油圧

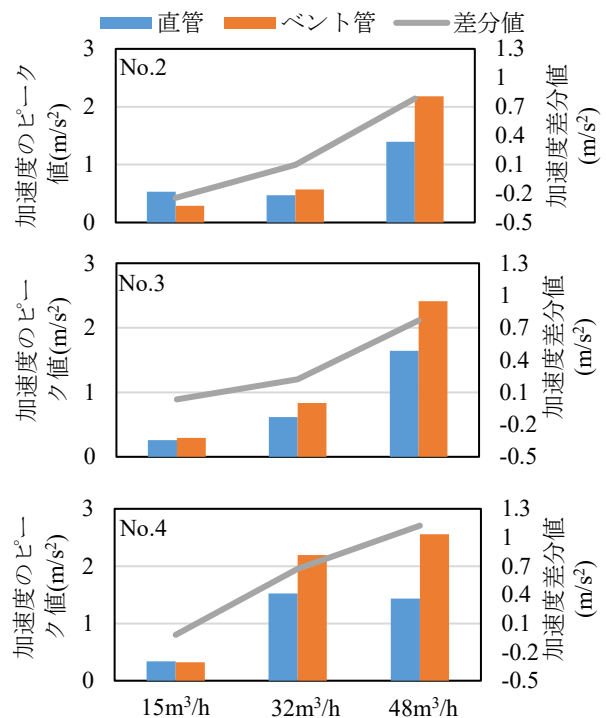


図-4 振動加速度のピーク値及び加速度差分値

4. 配管閉塞リスク評価に関する考察

4.1 圧送波形の変動係数による評価

図-5 に、順調圧送時における、配合ごとの管内圧力及びポンプ主油圧の圧力波形を示す。本実験の範囲では、同ケースかつ同じ圧送速度において、1回のピストン挙動に対応する管内圧力及びポンプ主油圧の圧力波形の乱れの形状は、CH1の管内圧力とポンプ主油圧を比較した際、目視により、波形の角の現れ方や波形の傾き等から、同様な傾向であることが確認できる。そして、管内圧力及びポンプ主油圧とも、粗骨材量の増加、及び圧送速度の上昇に伴い、1回のピストン挙動における圧力波形の乱れは大きくなる傾向となった。ゆえに、1回のピストン挙動における圧力波形の乱れを定量的に確認する手法について検討を行った。

図-6 に、圧送速度ごとの管内圧力及びポンプ主油圧の代表的な1回のピストン挙動における変動係数を示す。管内圧力及びポンプ主油圧の変動係数は、図-7 に示すように、コンクリートピストンによる圧力の乱れを除外するため、圧力の比較的安定した部分を算出範囲とした。また、算出範囲における圧力波形の勾配の影響を考慮し、算出範囲における近似線に対する実測値の差を二乗し、総合計した後実測値の個数で除したものを「近似線からのばらつき」、近似線からのばらつきを平均圧力で除した値を「近似線からの変動係数」として整理を行った。

図-6 より、ポンプ主油圧の近似線からの変動係数は管内圧力の近似線からの変動係数よりも大きく、圧送の乱れをより鋭敏に捉えていることが示唆された。また、No.4の圧送速度 48m³/h の場合に変動係数が特に高くな

る傾向であった。これは、粗骨材量の増加による骨材同士のかみ合いと解除に起因すると考えられ、骨材量の多い配合の高速圧送時は、圧送の乱れが大きくなり、配管閉塞のリスクが高まることが示唆される。

4.2 閉塞箇所による圧力波形の違いについての考察

図-8 に、No.1及びNo.5の圧送時における閉塞時の管内圧力及びポンプ主油圧の圧力波形を示す。No.1の閉塞直前の圧力波形に着目すると、閉塞を生じる直前にポンプ主油圧及びCH1～CH7の管内圧力が急上昇していることが確認できる。これは、No.1の圧送における閉塞がポンプ車の根本から離れたテーパ部(5B→4B管)で生じたことから、テーパ部以前の測定箇所の管内圧力は上昇し、テーパ部以降の測定箇所の管内圧力は大きく変化しなかったことが考えられる。

また、No.5における閉塞時は、ポンプ主油圧が急激に上昇しているに対して、管内圧力波形は、緩やかに減少する傾向であった。この測定結果は、No.5における閉塞が管内圧力の測定箇所以前のポンプ車根本付近で生じたことに起因すると考えられる。また、本実験におけるテーパ部での閉塞時の圧力波形の形状は、管内圧力とポンプ主油圧のいずれも、波形の末尾に角のような形状を示す傾向にあった。また、ポンプ車根本付近における閉塞時の圧力波形の形状は、波形の先端に角のような形状を示す傾向にあった。これらの結果は一事例ではあるが、圧送時の管内圧力及びポンプ主油圧の圧力波形の末尾に角のような形状が見られた際はテーパ部における閉塞を生じる可能性があり、圧力波形の先端に角のような形状が見られた際はポンプ車根本において閉塞を生じるなど

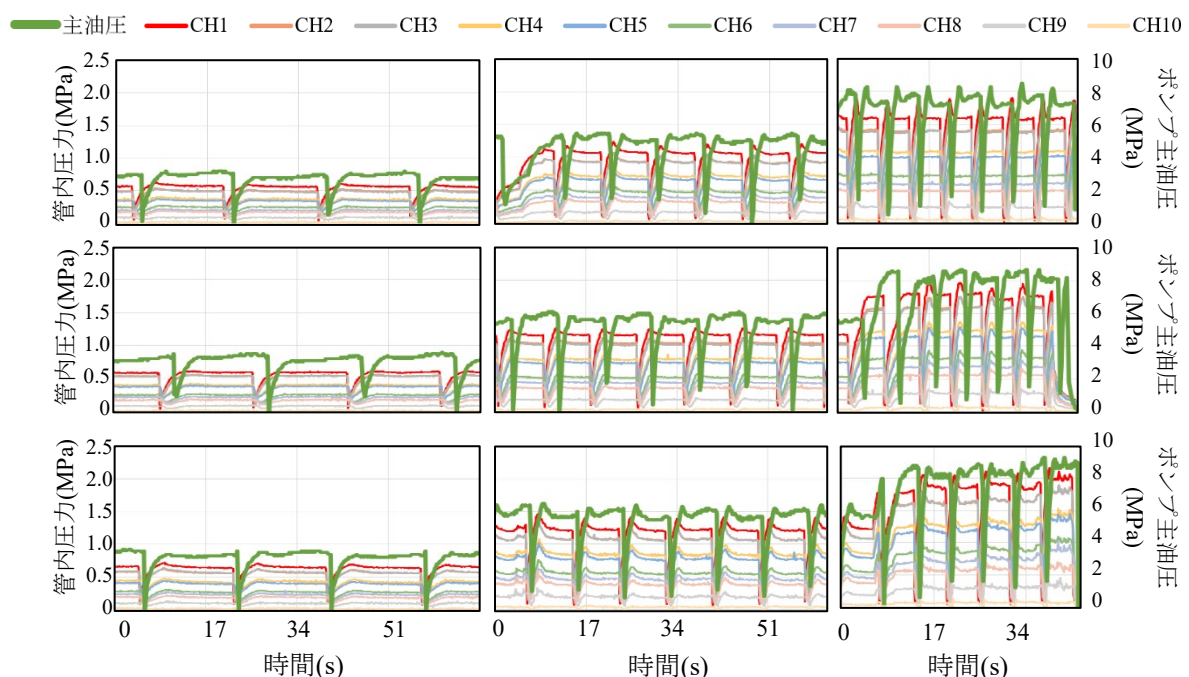


図-5 順調圧送時の圧力波形(上から No. 2, No. 3, No. 4, 左から圧送速度 15, 32, 48m³/h)

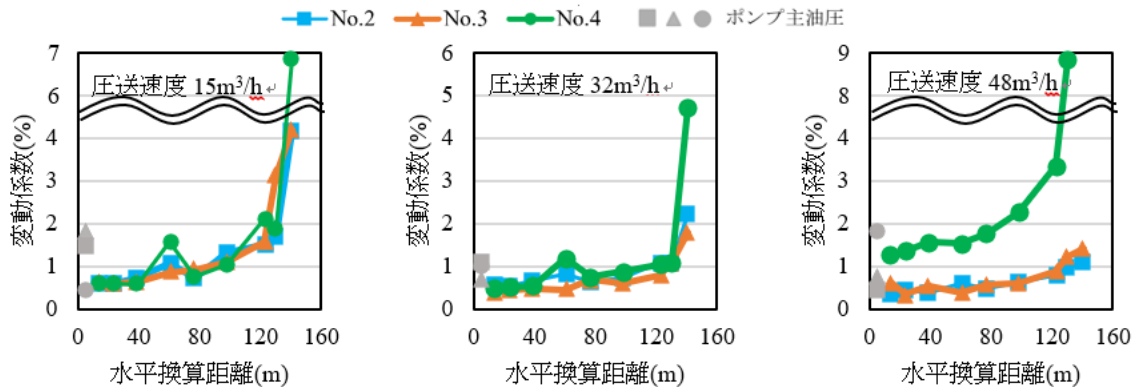


図-6 管内圧力及びポンプ主油圧における近似線からの変動係数

のように、圧力波形の形状より閉塞危険箇所の推定することの可能性が示唆される。

4.3 管内圧力の特徴的な圧力波形についての考察

図-9 に、No.2 及び No.4 の圧送速度 32m³/h、48m³/h での管内圧力の圧力波形を示す。圧力波形に着目すると、No.4 の圧送速度 48m³/h での圧送では、圧力計の計測位置に関わらず同様な乱れが生じていたことが確認できる。また、図-6 及び図-9 で示されるように圧力波形の近似線からのばらつき及び変動係数についても、No.4 の圧送速度 48m³/h は他の圧送条件と比較して大きくなる結果となった。この乱れの大きさは配管位置に関わらず同様で、ポンプ車からの距離によりほぼ減衰していないことから、コンクリートピストンによる圧力ではなく、圧送の流れに対して垂直の向きに作用する圧力が影響していることが推察される。

このように、ポンプ車付近から配管位置に関わらず同様な圧力の乱れが生じる要因としては、骨材のかみ合いと解除に起因すると推察される。骨材のかみ合いと解除の影響は圧送流の方向に対して、広範囲の角度で影響していると考えられるが、配管と垂直方向に設置された圧力計には、流れの方向と垂直方向に動く骨材の衝突圧を検知しているものと推察される。そのため、ポンプ車根本から先端まで圧送速度は変わらないことから、骨材の衝突に起因する衝突圧はポンプ車根本から先端まで同様に発生すると考えられる。特に No.4 の 48m³/h での圧送時は圧送速度が速く、粗骨材量の多い配合であることからコンクリート中の骨材の動きも激しくなる。よって、骨材同士の衝突やかみ合いにより圧力の乱れが生じ、配管閉塞の危険性が高い圧送であったことが推察される。ゆえに、コンクリートの圧送時には、配管に取付けた圧力計の値の乱れを確認することで、配管閉塞リスクを予測できると考えられる。

4.4 配管閉塞リスク低減対策についての考察

(1) 配管閉塞リスク予測方法

本実験の結果を踏まえて、配管閉塞リスクを予測する

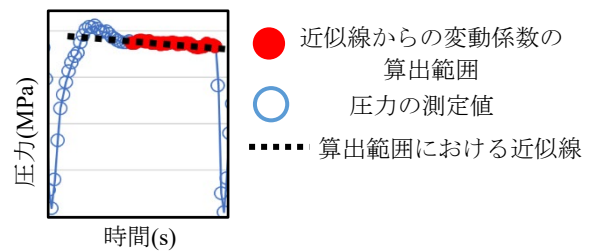


図-7 変動係数の算出範囲

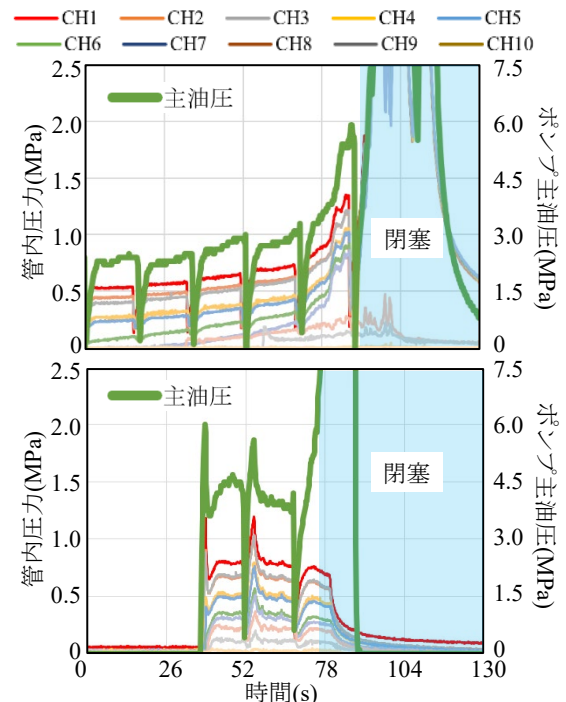


図-8 閉塞時の圧力波形(上: No. 1, 下: No. 5)

ための対策として、以下のような方法が考えられる。

1) 圧力波形による閉塞危険箇所の予測

本実験では、ポンプ主油圧の圧力波形の先端に角が生じる場合にポンプ車根本付近が閉塞し、末尾に角が生じる場合はテーパ管付近が閉塞したことから、圧力波形の形状より閉塞危険箇所を推定できる可能性があると考えられる。

ポンプ車根本付近の閉塞リスクがある場合は、最も

ポンプ車に近いポンプ主油圧の圧力波形に着目し、テーパ管周辺の閉塞リスクがある場合は、ポンプ主油圧や管内圧力の圧力波形に着目し、確認する必要がある。

2) 圧力波形の変動係数による閉塞リスクの予測

コンクリート圧送時はポンプ主油圧及び管内圧力を測定し、圧力波形の安定域における近似線からの変動係数を算出し、確認することで閉塞リスクを予測できると考えられる。近似線からの変動係数が高い場合は骨材のかみ合いによる閉塞リスクが高いことが推察される。また、圧送速度が速い場合は骨材同士の衝突やかみ合いが顕著となり、近似線からの変動係数の上昇が見込まれるため、閉塞の危険性が高いことが予測される。

特に、ポンプ車付近から配管位置に関わらず同様な圧力の乱れが生じ、近似線からの変動係数が高い場合は、配管閉塞に注意する必要がある。

3) 振動加速度計による閉塞リスクの予測

圧送速度の速い圧送時は、直管及びベント管の振動加速度のピーク値の差分値が大きくなる傾向にある。よって、コンクリートの圧送時の直管及びベント管に振動加速度計を取付け、振動加速度を測定することで、圧送時の骨材の乱れを感知し、閉塞リスクの危険性を予測することが可能である。

(2) 配管閉塞リスク低減対策

上記の閉塞リスク予測により、閉塞リスクが生じた場合の対応策を以下に示す。

1) 圧送速度の低下

ポンプ主油圧及び管内圧力は圧送速度の上昇に伴い増加傾向にあり、振動加速度や圧力波形の近似線からの変動係数も圧送速度の上昇に伴い増加傾向にあった。ゆえに、圧力波形による配管閉塞リスクにより閉塞が危惧される場合は、圧送速度を低下させることで骨材の乱れを抑制し、閉塞リスクを低減させることが可能である。

2) コンクリート配合の見直し

管内圧力の近似線からの変動係数の結果より、コンクリートの圧送時における閉塞は主に骨材のかみ合いに起因するため、配合の選定時には骨材の粒形が整ったものを選択し、粗骨材量を減らすことで骨材のかみ合いを低減させることが可能であると考えられる。

3) 配管条件の見直し

PL 配合において、テーパ管の長さの違いが閉塞の有無に影響していたことから、テーパ管は可能な限り長く、絞り度合いのゆるやかな管を使用することで閉塞リスクを低減させることが可能であると考えられる。

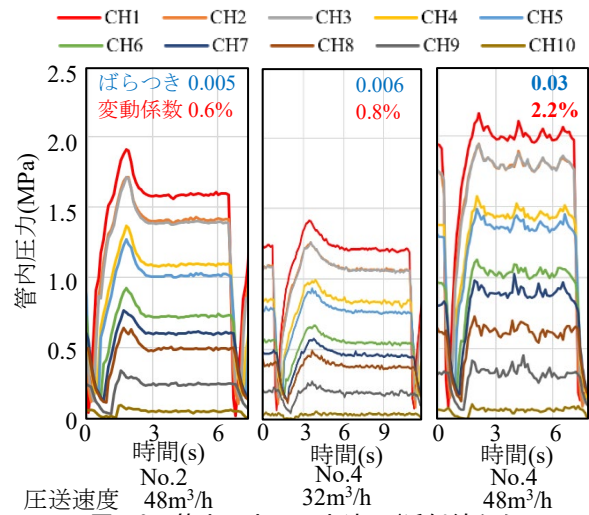


図-9 管内圧力の圧力波形(近似線からのばらつき及び変動係数はCH1~8の平均値)

5. まとめ

本研究では、コンクリートの圧送における配管閉塞時の管内圧力やポンプ主油圧のデータを測定することで、閉塞時における管内圧力やポンプ主油圧の変動を確認し、その傾向を分析した。

その結果、管内圧力及びポンプ主油圧とも、粗骨材量の増加、及び圧送速度の上昇に伴い、1回のピストン挙動における圧力波形の乱れは大きくなる傾向となった。また、圧力波形の形状より閉塞危険箇所の推定することの可能性が示唆された。そして、骨材の衝突に起因すると想定される衝突圧はポンプ車根本から先端まで同様に発生する傾向が見られた。

また、実験結果の分析により得られた知見を踏まえ、コンクリート圧送における配管閉塞リスク予測方法と配管閉塞リスク低減対策について提案した。

謝辞：

本研究は、極東開発工業(株)に多大なご協力を頂き実施致しました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリートのポンプ施工指針[2012年版]，コンクリートライブラリー135，2012
- 2) 案浦侑己，橋本紳一郎，渡辺健，橋本親典：振動加速度計を用いたコンクリートの圧送性簡易評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp1201-1206，2013
- 3) コンクリート工学会：コンクリート圧送工法ガイドライン 2009 および解説，2009
- 4) 橋本紳一郎，平川恭熈，南浩輔，中島良光：コンクリートの簡易圧送性計測手法における配管条件及び圧送性判定の検討，セメント・コンクリート論文集，Vol69，2015